

Réduction des émissions d'oxydes d'azote d'une turbine à gaz aérodérivée

par
Michel Samson

Département de génie civil et mécanique appliquée
Université McGill
Montréal, Canada
Décembre 2018

Mémoire de maîtrise soumis à l'Université McGill
en réponse partielle aux exigences du diplôme de
maîtrise en ingénierie

© Michel Samson, 2018

Résumé

De nos jours, les turbines à gaz dérivées des réacteurs d'avion sont couramment employées pour des applications au sol telles que la génération d'électricité et la transmission mécanique. Contrairement à leur prédécesseur, ce type de moteur est sujet à des normes environnementales beaucoup plus strictes en termes de rejets atmosphériques. Ainsi, les fabricants d'équipement d'origine (FEO) sont contraints de mettre au point des technologies permettant une réduction significative des émissions de polluants sans nuire à la performance actuelle des moteurs, voire même en l'améliorant.

Ce travail visait à réduire les émissions d'oxydes d'azote (NO_x) provenant d'une turbine à gaz aérodérivée qui a été développée par la compagnie Siemens. Cet objectif requérait l'homogénéisation du mélange entre l'air et le combustible avant qu'il ne brûle dans la chambre de combustion. Plus spécifiquement, la configuration des trous d'une plaque perforée qui est située dans le réseau de distribution d'air de cette chambre de combustion devait être optimisée. Un modèle simplifié d'une section du véritable moteur a donc été conçu et bâti pour permettre d'effectuer des expériences à l'aide d'une technique de fluorescence planaire induite par laser (FPIL). Le prototype a été dimensionné en fonction de calculs théoriques, de simulations numériques et de raisons pratiques. Il a été nécessaire d'apporter certaines modifications à sa géométrie pour satisfaire les nombreuses contraintes expérimentales. Le choix de remplacer l'air et le combustible composant le mélange à homogénéiser par de l'eau a été justifié sous conditions que les nombres de Reynolds de l'écoulement produit soient supérieurs à 10,000 et que le ratio de la vitesse des réactants soit respecté. Un accès physique à l'intérieur du prototype était requis pour changer les pièces amovibles entre les différents essais. En somme, les techniques employées pour construire le prototype expérimental et son support incluent l'usinage en atelier, l'impression 3D, l'utilisation d'une machine-outil à commande numérique et la soudure. Un système hydraulique a également été conçu et installé pour alimenter le prototype.

Finalement, des recommandations théoriques basées sur une revue littéraire du sujet ont été proposées concernant la configuration optimale des trous de la plaque perforée. Elles suggèrent qu'une plaque perforée de 6 mm d'épaisseur dont la solidité correspond à 35% et comportant des trous de forme conique avec un angle intérieur de 41° offre la plus grande intensité de turbulence, et donc le mélange le plus homogène.

Abstract

Nowadays, aeroderivative gas turbines are commonly used for land-based applications such as electrical power generation and mechanical drive. As opposed to jet engines, they are subject to more stringent regulations regarding pollutant emissions. Hence, the original equipment manufacturers (OEM) are challenged to develop pollutant control strategies to deal with these unprecedentedly low emission limit values while trying to maintain, or even improve, current gas turbines performance.

This work aimed to reduce the nitrogen oxides (NO_x) emissions from an aeroderivative gas turbine developed by Siemens. Such a goal required the homogenization of the air and fuel mixture prior to its combustion which is achieved through optimization of the burner configuration. More specifically, the hole pattern of a perforated plate located in the combustion chamber had to be improved. Therefore, a simplified model of a section of the actual combustor was designed and built to accommodate for a measurement technique called planar laser-induced fluorescence (PLIF). The test rig was sized in function of theoretical calculations, computational fluid dynamics analysis and practical reasons. It has been decided to replace the air and fuel that compose the mixture of interest by water in order to perform nonreacting tests. Furthermore, to achieve optimal similarity between the experimental and real mixing conditions, the test rig must be operated at the engine velocity ratio and at Reynolds numbers above 10,000. A physical access to the interior of the prototype was needed to change the removable parts in between the different experiments. The construction techniques that were used to build the prototype and its support include machining, 3D printing, computer numerical control machining and welding. A hydraulic system was also designed and installed in the experimental facility to feed the test rig. Finally, theoretical recommendations based on a literature review of the topic were made concerning the optimal hole pattern of the perforated plate. It is suggested to use a perforated plate with a solidity of 35%, a thickness of 6 mm, and 41° tapered holes to provide the highest degree of turbulence intensity, and thus the most uniform mixture of air and fuel in terms of homogeneity.

Remerciements

Je voudrais d'abord remercier ma directrice de recherche à l'Université McGill, Professeure Susan Gaskin, pour l'encadrement dont j'ai bénéficié. Ses précieux conseils ont su me guider à travers ce projet tumultueux. J'apprécie particulièrement la liberté qu'elle m'a donnée en cette période où mon développement professionnel ne se limitait pas strictement aux exigences de mon programme d'étude. J'admire son intelligence, sa dévotion pour tout ce qui lui tient à cœur, sa philosophie de vie et son calme déconcertant face aux situations angoissantes.

Je tiens également à remercier mon superviseur de projet chez Siemens, Gilles Bourque, pour l'opportunité offerte et la confiance accordée. Je suis très reconnaissant du temps qu'il a consacré à mon projet malgré son horaire extrêmement chargé.

Je ne serais jamais parvenu à terminer ce projet sans le savoir-faire de mon technicien de laboratoire, John Bartczak. Son sens de l'humour n'a d'égal que sa générosité et ses compétences. Jusqu'ici, nos billets de loterie ne nous auront pas rendus millionnaires, mais toute l'expérience que j'ai acquise grâce à lui a été encore plus enrichissante.

Je voudrais exprimer ma sincère gratitude envers le programme Accélération de Mitacs, la compagnie Siemens et le département de génie civil et mécanique appliquée de l'Université McGill, qui ont conjointement financé ce projet.

Je dois aussi une fière chandelle à mes deux stagiaires estivaux, Philippe Dallemagne et Labib Kallas. Ils ont vraiment fait la différence, autant pour mon projet grâce à leur aide que pour mon poids à cause de leurs restaurants libanais.

Je voudrais terminer en remerciant mes amis, ma famille et Leah pour leur amour et soutien continus tout au long de ce projet qui par moment était très éprouvant.

Je dédicace ce mémoire à ma grand-maman, pour qui les trois années qu'a durées ce projet de maîtrise ont été particulièrement difficiles.

Le meilleur reste à venir.

Table des matières

Résumé	ii
Abstract	iv
Remerciements	v
Table des matières	vii
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xiii
Liste des équations.....	xiv
Nomenclature	xv
Symboles	xvi
Acronymes.....	xvi
Chapitre 1 : Introduction	1
1.1 Contexte de l'étude	1
1.2 Objectifs du projet	3
1.3 Organisation du mémoire.....	4
Chapitre 2 : Considérations théoriques et revue littéraire.....	6
2.1 Mécanismes de formation des oxydes d'azote	6
2.2 Combustion à mélange préalable pauvre.....	12
2.3 Écoulement à travers une plaque perforée	18
2.4 Fluorescence induite par laser.....	22
Chapitre 3 : Méthodologie	27
3.1 Critères de conception des chambres de combustion à mélange préalable pauvre en combustible.....	27
3.1.1 Problèmes opérationnels à éviter	28
3.1.2 Stratégies existantes.....	30

3.2	Processus de conception du montage expérimental.....	39
3.2.1	Survol des contraintes à respecter	39
3.2.2	Choix des réactants	40
3.2.3	Considérations optiques	43
3.2.4	Dimensionnement du prototype	46
3.2.5	Considérations pratiques	55
3.2.6	Système hydraulique.....	60
3.2.7	Version finale du prototype.....	68
Chapitre 4 :	Résultats.....	71
4.1	Châssis du prototype.....	71
4.2	Composantes du prototype	77
4.3	Assemblage du prototype	81
4.4	Installation dans la salle expérimentale	82
Chapitre 5 :	Conclusion	86
5.1	Revue du mémoire.....	86
5.2	Recommandations pour travaux futurs.....	87
5.3	Recommandations théoriques	91
5.4	Contributions de l'étude.....	92
Références		94

Liste des figures

Figure 1 – Principales voies de formation des oxydes d’azotes lors de la combustion des combustibles fossiles (Lieuwen & Yang, 2013)	7
Figure 2 – Dépendance des émissions de NO _x face à la température des flammes produites par des combustibles liquide et gazeux (Snyder, Rosfjord, McVey, & Chiappetta, 1994)8	
Figure 3 – Fenêtre de températures des flammes permettant de minimiser les émissions de monoxyde de carbone et d’oxydes d’azote (Lefebvre & Ballal, 2010).....	13
Figure 4 – Effet du rapport d’équivalence et du coefficient de non-uniformité sur les émissions de NO _x pour un tube de flamme avec une température d’entrée d’air correspondant à 600 K, une pression interne de 0.3 MPa et un temps de résidence de 2 ms (Lyons, 1981)	16
Figure 5 – Illustration des lignes de courant de l’écoulement passant à travers a) la plaque mince aux trous coniques et b) la plaque épaisse aux trous rectilignes (Liu & Ting, 2007)	22
Figure 6 – Section transversale de la chambre de combustion étagée GE DLN-1 (Dry Low NO _x) montrant ses principales composantes (Davis & Black, 2000)	31
Figure 7 - Mode opératoire prémélangé du système à combustion étagée GE DLN-1, privilégié pour les charges mécaniques entre 50 et 100% de la valeur de base (Davis & Black, 2000)	32
Figure 8 - Mode opératoire primaire du système à combustion étagée GE DLN-1, privilégié pour les charges mécaniques entre 0 et 20% de la valeur de base (Davis & Black, 2000)	33
Figure 9 - Mode opératoire pauvre-pauvre du système à combustion étagée GE DLN-1, privilégié pour les charges mécaniques entre 20 et 50% de la valeur de base (Davis & Black, 2000)	34
Figure 10 - Mode opératoire secondaire du système à combustion étagée GE DLN-1, nécessaire à la transition entre les modes pauvre-pauvre et prémélangé (Davis & Black, 2000)	34

Figure 11 – Coupe transversale montrant le profil 2D de la chambre de combustion de la turbine SGT-A65 TR développée par la compagnie Siemens (Siemens, 2014).....	36
Figure 12 - Coupe transversale montrant le profil 3D de la chambre à combustion de la turbine SGT-A65 TR développée par la compagnie Siemens (Jetté, 2016)	37
Figure 13 – Turbine à gaz SGT-A65 TR développée par la compagnie Siemens (Siemens, 2014)	38
Figure 14 –Profil 2D simplifié de la pièce d'intérêt	45
Figure 15 – Comparaison des formes obtenues par révolution et par extrusion du profil 2D	46
Figure 16 – Développement de la région turbulente d'un écoulement à surface libre par rapport à son profil de vitesses vertical et de sa distance avec la paroi (Schobeiri, 2010)	48
Figure 17 –Nombres de Reynolds à travers les trous de la plaque perforée étant associée à différentes combinaisons de distance d'extrusion linéaire du profile 2D et d'échelle pour le dimensionnement du prototype, et ce, pour une pompe de 1/3 hp alimentant le système avec de l'eau à 20°C.....	50
Figure 18 – Lignes de courant de l'écoulement dans la zone de mélange telles que produites par analyses de mécanique des fluides numérique pour des prototypes à échelle 1:1 possédant des largeurs de montage différentes.....	53
Figure 19 –Fractions massiques du fluide dans la zone de mélange, telle qu'obtenue par analyses de mécanique des fluides numérique	54
Figure 20 – Courbe des pourcentage cumulatifs du coefficient de non-uniformité dans la zone de mélange du prototype choisi comme exemple pour le fluide traversant la plaque perforée	55
Figure 21 – Vue aérienne du système d'insertion des pièces amovibles à l'intérieur du prototype	56
Figure 22 – Composantes ajoutées aux plaques perforées pour permettre leur insertion dans les fentes du prototype ainsi que pour empêcher l'écoulement de les contourner une fois qu'elles sont mises en place	57
Figure 23 – Délimitations de la zone d'intérêt pour l'étude du mélange ainsi que des trois faces du prototype où l'installation de fenêtres pour l'accès visuel est requise.....	58

Figure 24 – Cadrages utilisés pour l’installation des fenêtres.....	59
Figure 25 – Illustration de la section transversale en forme de T des cadrages en acier inoxydable et des différents joints d’étanchéité.....	60
Figure 26 – Boîte collectrice munie de connexions pour les tuyaux et d’ouvertures menant aux différents compartiments du prototype.....	63
Figure 27 – Installation de la boîte collectrice à l’arrière du prototype avec des anneaux de caoutchouc pour assurer l’étanchéité des joints.....	64
Figure 28 – Point de fonctionnement à l’intersection de la courbe du réseau calculée pour le circuit alimenté à 3.55 L/s et des courbes de performance de la famille de pompe du modèle Magna 3 40-80 F développé par la compagnie Grundfos	66
Figure 29 – Représentation du système hydraulique conçu pour alimenter le prototype expérimental	67
Figure 30 - Version finale du prototype vue a) de côté, b) de derrière, c) de dessous et d) de face.....	69
Figure 31 – Plaque de PVC de 3 pouces d’épaisseur usinée à l’atelier de Précimax par machine-outil à commande numérique.....	72
Figure 32 – Procédure ayant servi à empiler les parois une par dessus les autres pour former le châssis du prototype.....	73
Figure 33 – Plaques de PVC dont les parois intérieures et extérieures ont été protégées avec du ruban adhésif tandis que les surfaces horizontales ont été nettoyées avant l’application de la colle.....	74
Figure 34 – Presse mécanique utilisée pour appliquer un poids uniforme sur le prototype lors de la période de cure du ciment.....	75
Figure 35 – Trous pour les boîtes collectrices et les fenêtres ayant été découpés du prototype par fraiseuse	76
Figure 36 – Machine-outil contrôlée manuellement à l’aide de manivelles et ayant été utilisée pour découper les trous sur le châssis du prototype	76
Figure 37 – Construction des cadrages en acier inoxydable par découpage des barres en T (image de gauche), soudage des morceaux découpés (image du centre) et polissage des surfaces pour corriger les imperfections (image de droite).....	77

Figure 38 – Étapes de construction pour l’installation des fenêtres dans leur cadrage (image de gauche), le collage au silicone (image du centre) et le perçage des trous autour des cadres (image de droite).....	78
Figure 39 – Étanchéité du prototype assurée par une feuille de caoutchouc découpée selon la forme du profil 2D et couvrant la surface horizontale sur laquelle est déposée la fenêtre principale (image de gauche), des feuilles de caoutchouc rectangulaire comportant des trous aux emplacements des vis pour les autres fenêtres (image du centre) et des anneaux de caoutchouc (image de droite).....	79
Figure 40 – Plaques perforées imprimées en 3D.....	80
Figure 41 – Étapes d’assemblage des composantes du prototype	81
Figure 42 – Prototype final assemblé et scellé	82
Figure 43 – Support du prototype avec intégration d’un système d’ajustement de sa position	84
Figure 44 – Système hydraulique dans la chambre noire où les expériences se déroulent .	85
Figure 45 – Configuration d’une plaque perforée incorporant les caractéristiques optimales de différentes études expérimentales ayant été réalisées.....	91

Liste des tableaux

Tableau 1 - Débit, vitesse d'écoulement et nombre de Reynolds associés à différentes puissances de pompes standards alimentant le compartiment simulant la prise d'air	61
Tableau 2 - Débit, vitesse d'écoulement et nombre de Reynolds associés à différentes puissances de pompes standards alimentant le compartiment simulant l'injecteur de combustible	62
Tableau 3 – Caractéristiques du système hydraulique conçu pour alimenter le prototype expérimental	68

Liste des équations

Équation 1 – Rapport d'équivalence (Bender, 2006).....	14
Équation 2 – Coefficient de non-uniformité du mélange (Danckwerts, 1958)	15
Équation 3 – Nombre de Reynolds (Reynolds, 1883).....	19
Équation 4 - Facteur de platitude (Tennekes & Lumley, 1972).....	20
Équation 5 - Facteur d'homogénéité (Liu, Ting, & Rankin, On the generation of turbulence with a perforated plate, 2004)	21
Équation 6 – Relation entre l'intensité lumineuse de la fluorescence émise par le traceur et la concentration du fluide ensemencé (Guilbault, 1973).....	23
Équation 7 – Simplification de la relation entre l'intensité lumineuse de la fluorescence émise par le traceur et la concentration du fluide ensemencé, lorsque celle-ci est très diluée	24
Équation 8 – Épaisseur de la couche limite (Schlichting, 1979)	48
Équation 9 – Critère de conception à respecter pour la largeur minimale prototype	49
Équation 10 – Débit fourni par une pompe	51
Équation 11 – Relation entre la vitesse et le débit d'un écoulement.....	51
Équation 12 – Ratio des vitesses réelles entre l'air et le combustible à respecter dans le prototype expérimental	62
Équation 13 – Pertes de charge linéaires dans une conduite circulaire (Darcy, 1857).....	65
Équation 14 – Format de l'équation correspondant aux courbes de calibration.....	89

Nomenclature

A_H	aire hydraulique de la section d'écoulement
b	longueur de la trajectoire d'une cellule
$\bar{c}$	concentration moyenne du combustible
c'_{rms}	moyenne quadratique des fluctuations spatiales de la concentration du combustible par rapport à la concentration moyenne
C	concentration du traceur dans le fluide
D_H	diamètre hydraulique du conduit
f	coefficient de friction
F	facteur de platitude
g	accélération gravitationnelle
Δh	pertes de charge linéaires
H	facteur d'homogénéité
I	intensité lumineuse de la fluorescence
I_0	puissance radiante de la lumière incidente
L	longueur du tuyau
m_c	masse de combustible
m_a	masse d'air
n :	nombre total de nœuds où les mesures ont été prises sur la section transversale du tunnel
n_c	nombre de moles de combustible
n_a	nombre de moles d'air
P	puissance de la pompe
Q	débit de l'écoulement
Re	nombre de Reynolds
Re_x	nombre de Reynolds dans la direction de la plaque
u	fluctuations de la vitesse d'écoulement de l'air dans le sens du courant

u'	moyenne quadratique des fluctuations de la vitesse d'écoulement de l'air dans le sens du courant
U	coefficient de non-uniformité du mélange
U_0	vitesse moyenne de l'écoulement au point considéré
V_a	vitesse d'écoulement de l'air
V_c	vitesse d'écoulement du combustible (ou du fluide simulant le combustible)
x	distance parcourue depuis le début de la surface solide causant la formation de la couche limite

Symboles

β	absorptivité molaire
δ	épaisseur de la couche limite
η	efficacité de la pompe
ν	viscosité cinématique du fluide
ρ	masse volumique de l'eau
Φ_f	efficacité quantique
$\emptyset$	rapport d'équivalence

Acronymes

CAO	conception assistée par ordinateur
CFD	<i>computational fluid dynamics</i>
CNC	<i>computer numerical control</i>
FEO	fabriquant d'équipement d'origine
FPIL	fluorescence planaire induite par laser
MOCN	machine-outil à commande numérique
NO _x	oxydes d'azote
TGA	turbine à gaz aérodérivée
VIP	vélocimétrie d'image de particule

Chapitre 1 : Introduction

Le présent chapitre fait la lumière sur les motivations sociales, environnementales et économiques qui ont menées à la matérialisation de ce projet. De plus, il décrit les objectifs spécifiques visés par l'étude et l'organisation du mémoire.

1.1 Contexte de l'étude

Comme leur nom le suggère, les turbines à gaz aérodérivées (TGA) tirent leur origine des réacteurs qui servent à propulser les avions. Elles sont utilisées pour des applications au sol, notamment la production d'énergie et la transmission mécanique. En dépit de la compétition provenant des traditionnels moteurs à piston et des plus récentes technologies telles que les piles à combustion, les TGA jouent actuellement un rôle notable dans le secteur de la génération d'énergie à source fixe et vont fort probablement demeurer l'un des acteurs importants de ce marché pour plusieurs décennies à venir (Lieuwen & Yang, 2013). Elles offrent effectivement une large gamme d'avantages concurrentiels, à savoir : des coûts en capital relativement faibles, peu d'entretien, une bonne efficacité en termes de conversion d'énergie, une longue durée de vie utile, une petite taille, un poids léger et une grande flexibilité d'opération. Par conséquent, tout porte à croire qu'il y aura une demande soutenue pour ces systèmes qui représentent plus souvent qu'autrement l'option la plus attrayante parmi les choix disponibles, particulièrement lorsque les besoins en production énergétique dépassent 5 MW et qu'il y a contrainte d'espace.

Une autre raison évidente qui appuie le futur prometteur des TGA est l'augmentation de la consommation énergétique mondiale qui grimpera de 34% d'ici 2050 selon le dernier bilan de l'Agence internationale de l'énergie (AIE, 2017). Cette hausse est principalement attribuable à l'augmentation fulgurante de la population mondiale, la croissance de

l'économie globale et l'intensification des processus d'urbanisation. Malgré une volonté de remplacer les énergies fossiles par des énergies renouvelables en raison des changements climatiques et des autres récentes préoccupations environnementales, les TGA continueront d'être utilisées à bonne efficacité pendant cette période de transition. D'autre part, les TGA pourront toujours venir compléter les énergies renouvelables à caractère intermittent, comme l'éolien et le photovoltaïque, dont la production d'électricité est variable. Le gain en popularité des énergies renouvelables est donc loin de mettre en péril l'avenir des TGA.

Ceci dit, les problèmes alarmants liés à la pollution de l'air et aux gaz à effet de serre forcent les autorités à imposer des normes environnementales de plus en plus strictes concernant les rejets atmosphériques provenant des TGA. Les principaux contaminants formés lors de la combustion des combustibles fossiles incluent les oxydes d'azote (NO_x), le monoxyde de carbone (CO), les oxydes de soufre (SO_x), les composés organiques volatils (COV) et la matière particulaire (MP). Parmi eux, les oxydes d'azote méritent une plus grande attention car ils s'avèrent particulièrement nocifs pour la santé humaine et l'environnement. D'une part, ils s'attaquent au système respiratoire du corps humain pour endommager les tissus pulmonaires et causer des troubles respiratoires, voire même la mort prématurée. D'autre part, ils sont précurseurs d'ozone troposphérique, de smog photochimique et de pluies acides qui ensemble contribuent au dérèglement climatique de même qu'à l'acidification et l'eutrophisation des plans d'eau douce, entre autres. De façon générale, les oxydes d'azote sont des composés chimiques formés d'oxygène et d'azote. Dans le cadre de cette étude, tout comme c'est habituellement le cas dans la littérature, les oxydes d'azote sont désignés par le terme NO_x et réfèrent à la somme des monoxydes d'azote (NO), aussi appelés oxydes nitriques, et des dioxydes d'azote (NO_2).

En vue de répondre aux nouvelles exigences en matière de rejets atmosphériques, les fabricants d'équipement d'origine (FEO) sont contraints de mettre au point des technologies permettant une réduction significative des émissions de polluants tout en améliorant perpétuellement la performance des TGA. Pour ce faire, un procédé de combustion à mélange préalable pauvre en combustible a été développé et est devenu une technique standard qui est maintenant couramment employée par la plupart des manufacturiers, particulièrement

pour les systèmes alimentés au gaz naturel (Bender, 2006). Il s'agit d'une stratégie de précombustion, c'est-à-dire qu'elle vise à empêcher la formation de polluants à la source plutôt que de les traiter à *posteriori*. En gros, elle repose sur un principe qui consiste à mélanger l'air et le combustible avant leur entrée dans la chambre de combustion, plutôt que de les injecter simultanément à l'intérieur de celle-ci. L'air est également ajouté en excès pour diluer le mélange et réduire la température des flammes produites. La combustion à mélange préalable pauvre en combustible comporte une variété de noms commerciaux ainsi que des particularités au sein de chaque système qui l'intègre. Dans tous les cas, le but consiste à réduire les émissions de NO_x provenant des TGA. Il s'agit d'ailleurs précisément du sujet sur lequel porte cette étude.

Ce projet de recherche a été réalisée en partenariat avec la compagnie Siemens. Par respect pour l'entreprise partenaire, l'auteur de ce mémoire a donc volontairement décidé de ne pas divulguer aucune information ou image risquant de compromettre l'entente de confidentialité établie. De ce fait, les détails propres au système qui fait l'objet de cette étude ont parfois été omis ou remplacé par un autre exemple du domaine public.

1.2 Objectifs du projet

L'objectif ultime du programme de recherche dans lequel s'inscrit cette étude consiste à homogénéiser le mélange entre l'air et le combustible d'une turbine à gaz développée par la compagnie Siemens dans le but de réduire ses émissions d'oxydes d'azote. Pour ce faire, il convient d'optimiser la disposition, voire même la configuration, des trous d'une plaque perforée située dans la chambre de combustion de ladite turbine. Il a été prévu qu'une technique de fluorescence planaire induite par laser soit utilisée pour acquérir les données quantitatives permettant d'évaluer la qualité du mélange en question. Un autre objectif du programme de recherche réside dans la validation des modèles de mécanique des fluides numériques qui sont développés par le partenaire industriel. Pour l'instant, ces derniers sont seulement basés sur des hypothèses théoriques. La fiabilité des résultats

produits dépend donc de la validité des approximations choisies lors de la représentation du problème. Si les données expérimentales obtenues en pratique concordaient avec les prédictions des simulations numériques, le niveau de confiance envers les modèles utilisés serait fortement augmenté. Ainsi, il en découlerait des prises de décisions exécutives plus efficaces par la compagnie.

Le succès d'un tel projet relève d'abord et avant tout de la fiabilité du montage expérimental. C'est pourquoi la conception et la construction d'un dispositif reproduisant au mieux les caractéristiques de la véritable turbine s'avèrent des étapes cruciales. Il en va de même pour le système hydraulique alimentant le prototype avec les fluides choisis pour simuler l'air et le combustible qui composent mélange à homogénéiser. D'autre part, les mesures de fluorescence planaire induite par laser nécessitent de mettre en place les installations optiques. Bref, la création d'un montage expérimental à la fois fonctionnel et fiable représente sans contredit un défi majeur et constitue l'objectif spécifique à atteindre dans le cadre de cette étude. Il en conviendra ensuite à l'Université McGill et la compagnie Siemens de décider si le programme de recherche dans lequel s'inscrit ce projet de maîtrise sera ultérieurement poursuivi afin que les expériences en laboratoire associées puissent être menées à terme.

1.3 Organisation du mémoire

Cette section présente brièvement la manière dont le reste du mémoire est structuré. Le chapitre 2 offre une revue littéraire des sujets pertinents à cette étude. Tout d'abord, les mécanismes de formation des oxydes d'azote seront expliqués. Une fois ces concepts assimilés, il sera vu comment leurs émissions peuvent être réduites grâce à un procédé de combustion à mélange préalable pauvre en combustible. L'amélioration de cette technique nécessitant l'optimisation des trous d'une plaque perforée, les considérations théoriques entourant les écoulements de fluides à travers une telle paroi seront ensuite présentées. Un

survol de la méthode d'acquisition des données expérimentales, la fluorescence planaire induite par laser, sera aussi effectué.

Le chapitre 3 présentera la méthodologie suivie pour atteindre les objectifs visés. Il a été jugé utile de commencer par étudier les caractéristiques et méthodes opérationnelles assurant le succès des systèmes existants. À partir de ces principes fondamentaux et des contraintes spécifiques au projet, le processus de conception du montage expérimental sera expliqué en détails. Toutes les étapes de construction ayant servi à sa matérialisation seront finalement présentées.

Le chapitre 4 fait office de présentation des résultats en décrivant et illustrant toutes les étapes de construction ayant servi à la matérialisation du prototype expérimental ainsi que du système hydraulique qui l'alimente.

Le chapitre 5 conclura ce mémoire en faisant un bref retour sur l'ensemble de l'œuvre. Des recommandations seront émises concernant les étapes à suivre pour la réalisation des travaux futurs, dans l'éventualité où ce projet devait être achevé. Une plaque perforée ayant le potentiel de réduire significativement les émissions de NO_x sera présentée. Le tout sera suivi des contributions apportées par cette étude ainsi que d'un mot de l'auteur en guise d'ouverture.

Chapitre 2 : Considérations théoriques et revue littéraire

Étant donné qu'un aperçu complet du phénomène de turbulence et des processus de combustion surpasse largement l'étendue de cette étude, ce chapitre portera plus spécifiquement sur la revue des sujets pertinents au projet réalisé. La première section décrira les mécanismes de formations des oxydes d'azote. Les concepts entourant la combustion à mélange préalable pauvre en combustible seront ensuite expliqués. La troisième partie traitera des écoulements à travers les plaques perforées. Finalement, la fluorescence planaire induite au laser sera expliquée à la dernière section du chapitre. Pour de plus amples informations sur la turbulence, le lecteur est invité à consulter les ouvrages de Tennekes et Lumley (1972) ainsi que de Pope (2000). En ce qui concerne les émissions de polluants provenant des turbines à gaz, les ouvrages de Lieuwen et Yang (2013) ainsi que de Lefebvre et Ballal (2010) sont des incontournables.

2.1 Mécanismes de formation des oxydes d'azote

Bien que des phénomènes naturels comme les orages entraînent aussi la formation de NO_x , leur principale source est de loin la combustion anthropogénique des combustibles fossiles. Comme le NO_2 résulte en fait tout simplement de l'oxydation du NO produit lors de la combustion, seuls les mécanismes de formation du NO dictent la formation de NO_x . Au total, quatre voies de formation distinctes produisent du NO à partir de l'azote présent dans l'air de combustion : (a) la voie thermique, (b) la voie N_2O , (c) la voie du NO prompt et (d) la voie NNH , soit un radical formé par l'addition d'un atome d'hydrogène sur l'azote moléculaire. De plus, le NO peut être généré à partir de l'azote lié de façon organique au combustible, si ce dernier en contient. Les différents mécanismes de formation du NO sont

schématisés à la Figure 1 et seront expliqués plus en détails de façon individuelle dans la section en cours.

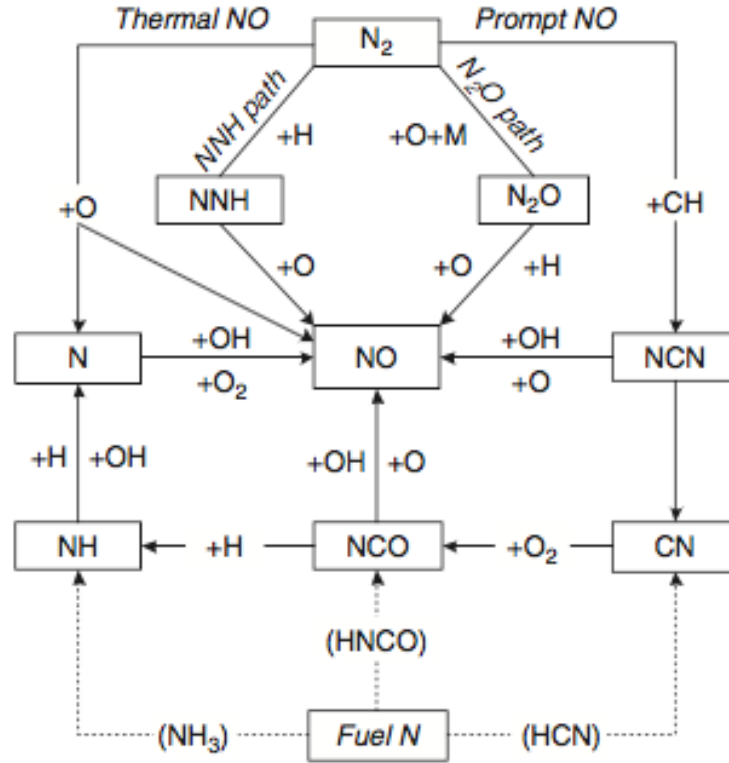


Figure 1 – Principales voies de formation des oxydes d'azotes lors de la combustion des combustibles fossiles (Lieuwen & Yang, 2013)

À des températures élevées, l'azote moléculaire (N_2) réagit d'abord avec les atomes d'oxygène (O) en présence pour produire du NO , comme indiqué par la réaction R1. Les atomes d'azote (N) ainsi libérés vont à leur tour réagir avec l'oxygène moléculaire de même qu'avec le radical OH pour former encore une fois du NO , tel que représenté par les réactions R2 et R3. Cet ensemble de réactions est connu sous le nom de mécanisme de Zeldovich et représente la voie thermique de formation du NO (Zeldovich, 1946). La réaction R1 constitue le facteur limitant de ce processus en raison de son énergie d'activation élevée.



Le taux de formation du NO dans les réactions précédentes est fonction de la température des flammes de combustion. Que ce soit pour un combustible liquide ou gazeux, les émissions de NO_x augmentent exponentiellement avec la température des flammes. À preuve, Snyder et al. (1994) ont utilisé un système de combustion au sein duquel l'air et le combustible étaient préalablement mélangés à l'aide d'un ajutage d'entrée tangentiel pour étudier l'effet de différents paramètres sur les émissions de NO_x. Les essais ont été conduits à des pressions variant entre 10 et 18 atm et des températures à l'entrée allant de 650 à 730 K. Les données expérimentales obtenues et présentées à la Figure 2 montrent bien que la formation de NO_x augmente exponentiellement avec la température des flammes, autant pour des combustibles gazeux que liquides. À noter que l'échelle utilisée pour l'axe des ordonnées est logarithmique, ce qui permet l'obtention de droites sur le graphique. Bien que produisant moins de NO_x, les combustibles gazeux sont beaucoup plus sensibles à la température des flammes que ceux liquides.

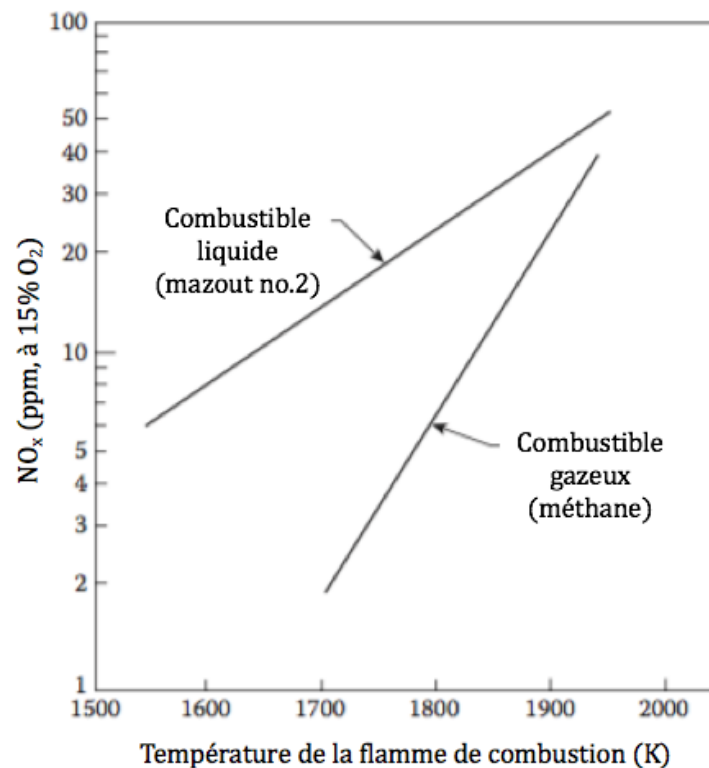


Figure 2 – Dépendance des émissions de NO_x face à la température des flammes produites par des combustibles liquide et gazeux (Snyder, Rosfjord, McVey, & Chiappetta, 1994)

Plutôt que de suivre le mécanisme de Zeldovich, une voie alternative qui est favorisée à basse température consiste en la recombinaison de l'azote moléculaire avec un atome d'oxygène pour former de l'oxyde nitreux (N_2O), d'après la réaction R4. Le N_2O peut ensuite produire du NO en réagissant soit avec les atomes d'oxygène ou avec ceux d'hydrogène (H), au moyen des réactions R5 et R6, respectivement.



Tout dépendamment de la manière dont les interactions s'enchaînent, il arrive que les produits des réactions du N_2O avec les atomes d'oxygène et d'hydrogène ne soient pas du NO. En effet, les réactions R7 et R8 montrent les composés chimiques formés par d'autres chemins pouvant être empruntés. Ces différentes avenues doivent être prises en compte dans les modèles de prédiction du NO généré par la route N_2O .



Drake et ses collègues (1990) ont réalisé les premières mesures directes du NO formé dans le front des flammes de combustion. Ils ont utilisé des pressions allant de 1 à 9 atm et des températures de flammes inférieures à 1800 K. Ils sont ainsi parvenus à tirer la conclusion que l'augmentation de la pression favorisait la formation du N_2O via la réaction R4 et que la destruction de ce N_2O en NO était accélérée par les atomes d'oxygène en super-équilibre dans le front de la flamme. Ces derniers atteignaient des concentrations jusqu'à 25 à 64 fois supérieures à celles d'équilibre. La quantité de NO formée par la voie N_2O dans une flamme à très basse température produite par un mélange préalable d'air et d'éthane à une pression de 6 atm correspondait à près de 50% des émissions de NO totale. Bien que ce résultat met en évidence l'importance de la voie N_2O dans de telles conditions, il ne faut pas perdre de vue que le NO formé par voie thermique augmente exponentiellement l'élévation de la température jusqu'à devenir prépondérant.

Fenimore (1970) est le premier chercheur à avoir suggéré la voie du NO prompt pour expliquer la présence de NO dans les stades préliminaires de la combustion qu'il a produite à partir de trois hydrocarbures, soit le méthane (CH₄), l'éthane (C₂H₄) et le propane (C₃H₈). Cette observation entraînait effectivement en conflit avec l'idée que la formation de NO était seulement contrôlée par des processus cinétiques tels que les voies thermique et N₂O, d'abord parce qu'ils requièrent plus de temps à se développer et, aussi, parce que cette zone de réaction relativement froide est caractérisée par un manque d'atomes d'oxygène et d'azote. Dix ans plus tard, Hayhurst et Vince (1980) ont proposé que la formation de NO prompt impliquait d'abord une réaction entre le N₂ contenu dans l'air de combustion et un radical hydrocarboné, principalement le CH, qui résulte en l'apparition d'un composé cyano accompagné d'un atome d'azote, comme il est possible d'observer à la réaction R9. L'atome d'azote ainsi libéré emprunte la seconde réaction (R2) du mécanisme de Zeldovich pour résulter en NO. Bien que non-négligeable, l'importance relative de cette voie par rapport aux autres est souvent assez faible. Sa contribution augmente toutefois avec un apport en combustible supplémentaire, qui a pour effet d'augmenter la quantité de radicaux hydrocarbonés disponible dans la zone de réaction.



Bozzelli et Dean (1995) ont évoqué la possibilité que le NNH, un radical formé à partir de l'azote moléculaire présent dans l'air de combustion et un atome d'hydrogène par la réaction R10, puisse se combiner à un atome d'oxygène pour produire du NO, grâce à la réaction R11.



Un peu comme c'était le cas pour la voie N₂O, il arrive que la réaction entre le NNH et l'atome d'oxygène forme d'autres produits que le NO. Dans leur analyse, Klippenstein et al. (2011) ont conclu que le taux de formation du NO par voie NNH diminuait avec l'élévation

de la température parce que les réactions alternatives R12 et R13 devenaient alors progressivement prédominante sur la réaction R11.



Certains combustibles, comme par exemple le charbon, les huiles et la biomasse, contiennent de l'azote fixé de façon organique. Durant le processus de combustion, cet azote lié au combustible réagit pour former du NO. Les réactions impliquées sont complexes en raison des structures particulières du lien entre l'azote organique et la molécule d'origine, mais elles sont généralement favorisées par des températures de flamme élevées. Le taux de conversion de l'azote dicte l'importance relative de ce mécanisme de formation du NO, qui peut s'avérer considérable (Merryman & Levy, 1975). Ce projet porte sur l'étude d'une turbine à gaz alimentée au méthane, un combustible qui ne contient pas d'azote organique.

Nicol et ses collègues (1992) ont étudié les émissions de NO_x provenant d'une turbine à gaz utilisant un procédé de combustion à mélange préalable pauvre en combustible, qui était du méthane. Les résultats ont d'abord été simulés à partir de modèles analytiques, développés par Drake et Blint (1991), puis validés en étant comparés aux données expérimentales obtenues. Ils ont démontré la sensibilité des émissions de NO_x et de leurs mécanismes de formation face à la pression du système de combustion, la température des flammes, l'apport en combustible dans la composition de son mélange avec l'air, le temps de résidence du mélange avant sa combustion et la configuration du réacteur. Par exemple, en variant les conditions du système de combustion, les chercheurs sont parvenus à modifier considérablement l'importance relative des différents mécanismes de formation des oxydes d'azote de sorte que leur principale source qui s'avérait être la voie du NO prompt lorsque le comburant était présent en quantité suffisante devenait plutôt le mécanisme de Zeldovich dans le cas contraire.

2.2 Combustion à mélange préalable pauvre

Les différents mécanismes de formation des NO_x ont été présentés à la section précédente. Les connaissances sur le sujet peuvent maintenant être appliquées aux problèmes d'atténuation des émissions de polluants dans les systèmes de combustion. Plus spécifiquement, la combustion à mélange préalable pauvre en combustible, communément appelée *lean-premixed combustion* en anglais, est la stratégie d'abattement des NO_x à laquelle ce projet de recherche s'intéresse. Il s'agit d'une technique qui jouît d'une popularité grandissante, particulièrement pour les turbines opérant au gaz naturel. L'idée principale consiste à injecter de l'air en excès dans le mélange de réactants pour abaisser la température des flammes produites et ainsi limiter la formation de NO par voie thermique. Les conditions de mélange pauvre en combustible ont aussi pour effet de réduire la disponibilité des radicaux hydrocarbonés qui génèrent le NO prompt. Pour accomplir ce procédé, l'air et le combustible sont mélangés avant leur entrée dans la chambre de combustion. Par opposition, les systèmes conventionnels ont recours à un procédé de combustion par flamme de diffusion où l'air et le combustible sont initialement séparés avant d'être injectés simultanément à l'intérieur de la chambre de combustion. Le mélange des réactants se produit alors par diffusion et les flammes générées atteignent des températures plus élevées, généralement supérieures à 2000 K (Lieuwen & Yang, 2013). Ceci dit, il existe une fenêtre optimale de températures des flammes, entre 1670 et 1900 K, à l'intérieur de laquelle les émissions de NO_x et de CO, de même que les risques liés à l'extinction de la flamme, sont minimisés (Lefebvre & Ballal, 2010). Celle-ci apparaît à la Figure 3 et montre comment la réduction des NO_x et des CO représentent deux objectifs conflictuels. Contrairement à la formation de NO_x qui augmente exponentiellement avec la température des flammes, le CO est produit lors de la combustion incomplète d'un combustible. La réduction de leurs émissions passe donc par l'amélioration de l'efficacité du processus de combustion. Cette dernière est étroitement liée à la température des flammes produites et au rapport entre l'air et le combustible. Généralement, plus les températures sont élevées, plus le taux de conversion du CO en CO_2 est accéléré.

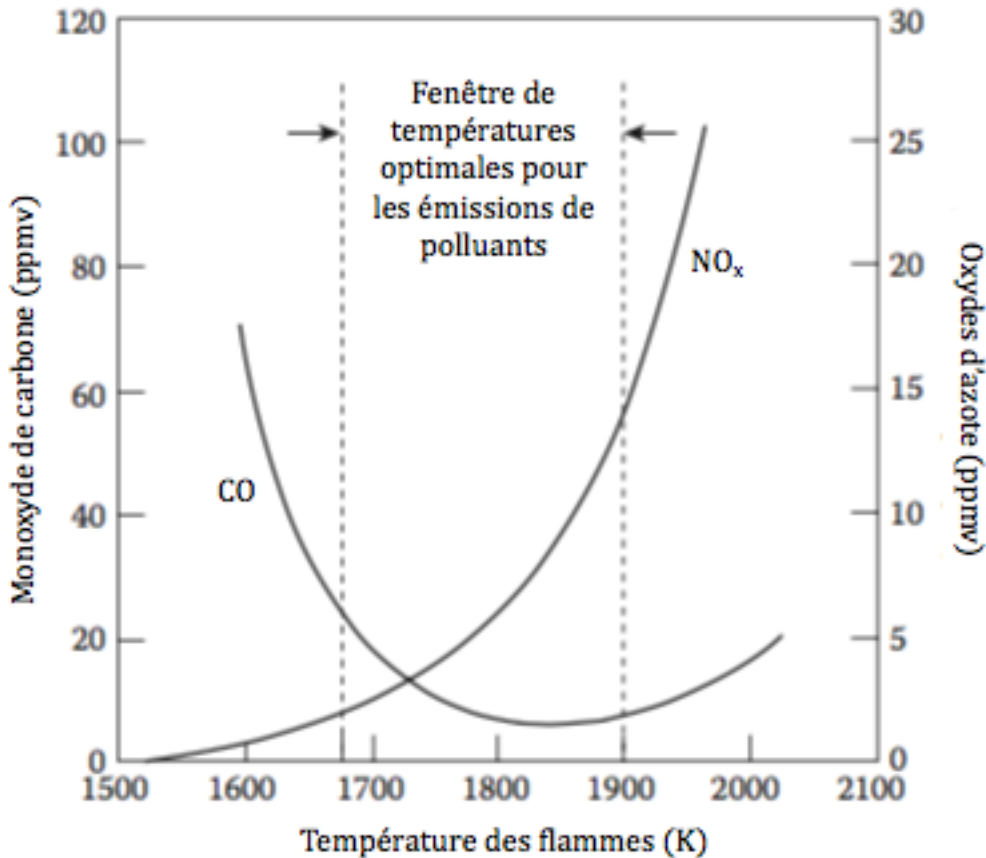


Figure 3 – Fenêtre de températures des flammes permettant de minimiser les émissions de monoxyde de carbone et d'oxydes d'azote (Lefebvre & Ballal, 2010)

Tel que mentionné, en pratique, l'abaissement de la température des flammes jusqu'à l'atteinte d'un seuil convenable est accompli par l'ajout d'air en excès, par rapport aux conditions stœchiométriques, dans le mélange des réactants. Un mélange est défini comme étant stœchiométrique si l'apport en air correspond précisément à la quantité théorique nécessaire pour consommer tout le combustible de la réaction. L'ajout d'air en excès résulte en conditions dites pauvres en combustible tandis qu'un apport en air insuffisant pour accomplir un mélange stœchiométrique crée, à l'inverse, des conditions riches en combustible. Dans le but de caractériser quantitativement le mélange de réactants du processus de combustion, il est possible d'utiliser directement le rapport combustible/air, exprimé sur une base massique ou molaire. Il s'avère toutefois plus courant et pratique de normaliser la valeur réelle de ce rapport combustible/air en la divisant par le rapport

combustible/air qui correspond aux conditions stœchiométriques de mélange, comme indiqué à l'Équation 1. Le paramètre ainsi obtenu se nomme rapport d'équivalence. Il est indépendant du type de combustible utilisé et donne une indication directe sur la composition du mélange. En effet, une valeur supérieure à 1 est révélatrice de conditions riches en combustible tandis qu'une valeur inférieure à 1 correspond plutôt à des conditions pauvres en combustible.

$$\phi = \frac{\text{rapport combustible/air}}{(\text{rapport combustible/air})_{st}} = \frac{m_c/m_a}{(m_c/m_a)_{st}} = \frac{n_c/n_a}{(n_c/n_a)_{st}}$$

Équation 1 – Rapport d'équivalence (Bender, 2006)

Où,

ϕ : Rapport d'équivalence

m_c : Masse de combustible

m_a : Masse d'air

n_c : Nombre de moles de combustible

n_a : Nombre de moles d'air

st : Suffixe qui réfère aux conditions stœchiométrique de mélange

Les principes fondamentaux de la stratégie ayant été survolés, il faut maintenant souligner la sensibilité des systèmes de combustion à mélange préalable pauvre face à la qualité du mélange entre l'air et le combustible. Idéalement, il est souhaitable que le mélange de réactants soit parfaitement homogène avant son entrée dans la chambre de combustion. Par contre, cet objectif est très difficile à accomplir en pratique et la qualité du mélange est plus souvent qu'autrement non-uniforme. Les fluctuations locales du rapport combustible/air au sein du mélange créent à la fois des zones trop pauvres en comburant, qui mènent à l'augmentation des émissions de CO ainsi que des risques liés aux instabilités de combustion, et des zones de forte densité en combustible, qui favorisent la formation de NO_x en brûlant à des températures plus élevées. Les émissions de NO_x sont donc non seulement influencées par la valeur moyenne du rapport combustible/air, mais également par ses fluctuations spatiales et temporelles. La qualité du mélange entre l'air et le

combustible peut être déterminée par le coefficient de non-uniformité, U , qui est calculé à l'aide de l'Équation 2. D'après cette formule, un mélange parfaitement homogène posséderait un coefficient de non-uniformité nul. Plus la concentration du combustible en un point s'écarte de la valeur moyenne, plus le coefficient de non-uniformité augmente.

$$U \equiv \frac{c'_{rms}{}^2}{\bar{c} \cdot (1 - \bar{c})} = \left(\frac{c'_{rms}}{\bar{c}} \right)^2 \cdot \frac{\bar{c}}{(1 - \bar{c})}$$

Équation 2 – Coefficient de non-uniformité du mélange (Danckwerts, 1958)

Où,

U : Coefficient de non-uniformité du mélange

$\bar{c}$: Concentration moyenne du combustible

c'_{rms} : Moyenne quadratique des fluctuations spatiales de la concentration du combustible par rapport à la concentration moyenne

La réduction des émissions de NO_x par l'optimisation du mélange des réactants a d'ailleurs fait l'objet de plusieurs études au fil des ans. Par exemple, Lyons (1981) a mené des expériences dans un tube de flamme pour déterminer l'effet du coefficient de non-uniformité du mélange sur les émissions de NO_x produites. Les résultats présentés à la Figure 4 ont été obtenus pour une température d'entrée d'air correspondant à 600 K, une pression du système de 0.3 MPa et un temps de résidence du mélange de 2 ms. Le combustible utilisé était du kérosène. Les courbes démontrent bien qu'en régime pauvre, c'est-à-dire pour des faibles valeurs du rapport d'équivalence, les émissions locales de NO_x augmentent de façon quasi-exponentielle avec l'augmentation du coefficient de non-uniformité. Pour un rapport d'équivalence de 0.6, il y a environ 0.75 g de NO_x émis par kg de kérosène consommé lorsque ce dernier est parfaitement mélangé à l'air auparavant. Les émissions grimpent de 0.75 à 1.45 g/kg, ce qui correspond à une augmentation de 48.3%, lorsque le coefficient de non-uniformité passe de 0 (parfaitement homogène) à 0.1. Lyons fait remarquer que l'augmentation des émissions de NO_x causée par la hausse du coefficient de non-uniformité du mélange est particulièrement importante lorsque le rapport d'équivalence vaut 0.7 ou moins,

soit lorsque les conditions d'opération sont pauvres en combustible. La Figure 4 révèle aussi que les émissions de NO_x sont maximisées quand la composition du mélange s'approche des conditions stœchiométriques, c'est-à-dire dans le cas où le rapport d'équivalence vaut 1. Fait intéressant, l'uniformité du mélange favorise les émissions de NO_x dans ce contexte. En effet, un coefficient de non-uniformité élevé augmente les fluctuations locales du rapport d'équivalence par rapport à sa valeur moyenne. De cette manière, une plus grande quantité de zones qui s'écartent des conditions de mélange stœchiométriques et qui forment moins de NO_x est créée.

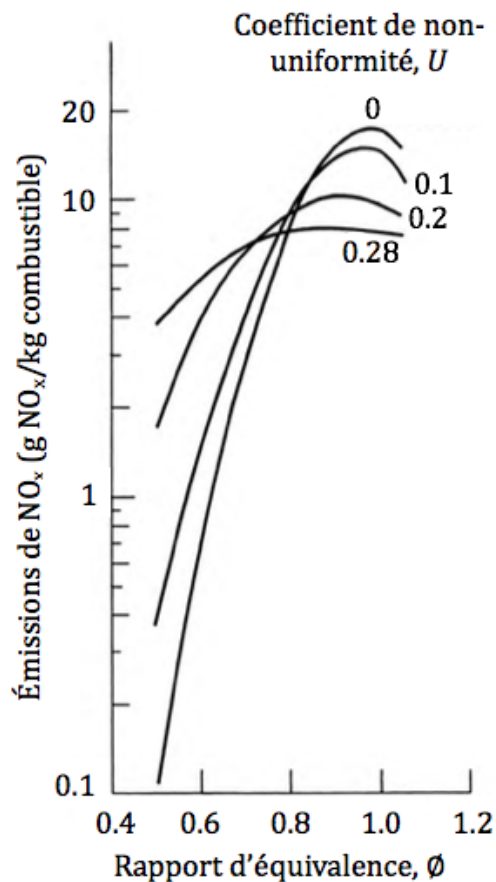


Figure 4 – Effet du rapport d'équivalence et du coefficient de non-uniformité sur les émissions de NO_x pour un tube de flamme avec une température d'entrée d'air correspondant à 600 K, une pression interne de 0.3 MPa et un temps de résidence de 2 ms (Lyons, 1981)

Dans le même ordre d'idées, Krämer et al. (1999) ont tenté de réduire les émissions de NO_x provenant de la turbine à gaz V64.3A, développée par la compagnie Siemens, en

optimisant son mélange de réactifs. En guise de prototype expérimental, ils ont construit un segment à l'échelle de la véritable chambre de combustion. Le mélange d'air et de combustible a été visualisé grâce à la technique de FPIL. Les émissions de NO_x ont subséquemment été mesurées dans une autre étude à l'aide d'un banc d'essai à combustion atmosphérique. Une réduction de 20% du diamètre des trous d'injection de combustible par rapport à leur grosseur initiale a permis d'accélérer l'écoulement de combustible et d'homogénéiser le mélange obtenu. L'ajout d'un dispositif de mélange en amont des injecteurs de combustible a intensifié le processus de mélange en générant plus de turbulence. Somme toute, les modifications apportées ont réduit les émissions de NO_x de 30%.

Dans une certaine mesure, le développement des turbines à gaz est axé sur la réduction des NO_x . Durant les stades préliminaires, une méthode permettant d'accélérer le processus de conception et de réduire ses coûts suscite donc un intérêt marqué pour les FEO. À cet égard, Sangl et al. (2014) ont récemment proposé une méthode économique et efficace permettant de prédire avec fiabilité les émissions de NO_x provenant d'une turbine à gaz. Cette dernière suggère de remplacer l'air et le combustible du procédé de combustion par de l'eau afin de produire un mélange non réactif à l'intérieur d'un prototype possédant la géométrie du brûleur étudié. La procédure requiert aussi l'utilisation des techniques de FPIL et de vélocimétrie d'image de particule (VIP) pour l'acquisition des données servant aux calculs. En parallèle, Sangl et ses collègues ont mené des expériences de combustion sur un autre banc d'essai en vue de mesurer les émissions de NO_x produites. Les résultats obtenus étaient en excellent accord avec les prédictions de leur méthode.

Dans la même veine, Prière et al. (2004) ont utilisé une méthode numérique basée sur une approche de simulation des grandes structures de la turbulence, mieux connue en anglais sous l'appellation *Large Eddy Simulation* (LES), pour étudier la qualité du mélange que procurent deux différentes configurations d'un même système d'injection de combustible. Le combustible est injecté à 10 endroits le long d'un canal rectangulaire à l'intérieur duquel l'air circule dans la direction transversale. La première configuration correspond simplement au canal, sans élément ajouté, tandis que la deuxième comporte un

dispositif de mélange particulier qui vise à créer des tourbillons en amont des injecteurs de combustible. La méthode de LES, initialement proposée par Smagorinsky (1963) et utilisée pour la première fois par Deadorff (1970), est devenue populaire pour expliquer les phénomènes d'instabilité de combustion. En résumé, elle modélise seulement les phénomènes de turbulence à plus petite échelle, qui sont propres aux caractéristiques du système étudié et à ses conditions d'écoulement spécifiques, en incorporant de façon plus générale les équations qui gouvernent les grandes structures de la turbulence. Prière et ses collègues ont personnalisé la méthode de LES à leur problème dans le but de prédire les fluctuations de la concentration du combustible dans le mélange de réactants. Ils ont validé leur démarche en comparant les simulations effectuées aux mesures de concentration instantanée obtenues par la compagnie Siemens sur le même montage expérimental dans le cadre d'une autre étude dont les résultats n'ont jamais été publiés, pour des raisons confidentielles. Ils ont conclu que l'ajout du dispositif de mélange entraînait une paire de vortex contrarotatifs qui renforçait considérablement l'intensité du mélange et le rendait ainsi plus homogène.

2.3 Écoulement à travers une plaque perforée

Comme il a été vu à la section précédente, l'homogénéité spatiale et temporelle du mélange de réactants avant son entrée dans le brûleur correspond à un critère d'une importance cruciale pour assurer le succès des systèmes de combustion à mélange préalable faible en combustible. Tel que mentionné, le manque d'uniformité d'un mélange résulte inévitablement en l'augmentation des émissions de polluants et des risques liés aux phénomènes d'instabilité de combustion, qui peuvent sérieusement endommager la turbine à gaz. Puisque le mélange préalable d'air et de combustible se déroule typiquement en seulement quelques millisecondes, force est d'admettre que les moindres détails comptent en ce qui concerne la conception de la chambre de combustion des TGA. En l'occurrence, même l'optimisation des trous sur une paroi dont la fonction est d'assurer la distribution de l'air dans la zone de mélange où le combustible est injecté peut avoir une incidence majeure

sur l'homogénéité du mélange avant sa combustion. Il s'agit justement de l'objectif ultime de ce projet. Les écoulements de fluides à travers les plaques perforées représentent donc un sujet digne d'intérêt qui sera abordé dans la section en cours.

Liu et al. (2004) ont réalisé des tests en soufflerie, soit un tunnel aérodynamique à l'intérieur duquel l'air circule de façon contrôlée, pour étudier l'effet de la solidité d'une plaque perforée et du diamètre de ses trous sur la turbulence générée. La solidité d'une plaque perforée, σ , est définie comme le rapport de l'aire de sa surface solide sur sa superficie totale, incluant l'aire des trous. Les valeurs de solidité testées correspondent à 35, 50 et 60%. Pour ce qui est de la grosseur des trous, des diamètres de 25.4, 38.1 et 50.8 mm ont été utilisés. Les nombres de Reynolds reproduits lors des essais s'élevaient à 15,000, 22,000 et 29,000. À toutes fins pratiques, le nombre de Reynolds est défini par l'Équation 3. Ce nombre adimensionnel représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses qui gouvernent l'écoulement d'un fluide.

$$Re \equiv \frac{U_0 D_H}{\nu}$$

Équation 3 – Nombre de Reynolds (Reynolds, 1883)

Où,

Re : Nombre de Reynolds

U_0 : Vitesse moyenne de l'écoulement au point considéré

D_H : Diamètre hydraulique du conduit

ν : Viscosité cinématique du fluide

La vitesse moyenne de l'écoulement, U , et la moyenne quadratique des fluctuations de la vitesse d'écoulement de l'air dans le sens du courant, u' , ont été mesurées à l'aide d'un anémomètre à fil chaud. Liu et ses collègues ont déterminé que l'intensité de la turbulence normalisée, u'/U , augmentait de façon exponentielle à la solidité de la plaque. Pour un diamètre de trous donné, plus la solidité de la plaque est élevée, plus l'espace entre les trous est grand. Lorsque les jets d'air occasionnés par chaque trou sont initialement plus distants,

ils prennent plus de temps à se mélanger. Bref, la plaque possédant une solidité de 35% s'est avérée être celle qui offrait l'intensité de turbulence la plus uniforme. L'influence de la solidité de la plaque sur la turbulence persistait même quand l'écoulement progressait dans le tunnel. À noter qu'une intensité de turbulence plus uniforme se traduirait par un mélange plus homogène car moins de fluctuations de la vitesse, autant spatiales que temporelles, en résulterait. Par contre, comme il faut s'y attendre, l'intensité de la turbulence générée par les trous diminuait en fonction de la distance parcourue depuis la plaque. L'ouvrage de Tennekes et Lumley (1972) promulgue un paramètre appelé facteur de platitude des fluctuations de la vitesse d'écoulement, calculé à l'aide de l'Équation 4.

$$F \equiv \overline{u^4} / (u')^4$$

Équation 4 - Facteur de platitude (Tennekes & Lumley, 1972)

Où,

F : Facteur de platitude

u : Fluctuations de la vitesse d'écoulement de l'air dans le sens du courant (m/s)

u' : Moyenne quadratique de u (m/s)

Une indication plus directe de l'uniformité de l'intensité de la turbulence, soit le facteur d'homogénéité, H , est fournie par Liu et ses collègues à l'Équation 5. Ils ont par ailleurs conclu que ce dernier, et donc les fluctuations de la vitesse d'écoulement par rapport à la moyenne, se voyaient minimisés par un facteur de platitude valant 3. La déviation de F de part et d'autre de cette valeur entraînait une augmentation de H . Étonnement, ils ont avancé que pour les conditions reproduites, le nombre de Reynolds avait des effets négligeables sur la l'intensité de la turbulence. Ceci est probablement dû au fait que le régime de turbulence est pleinement développé pour tous les nombres de Reynolds qu'ils ont choisis, qui se situent tous à l'intérieur de l'intervalle 15,000 à 29,000, d'où la raison pour laquelle l'écoulement se comporte sensiblement de la même façon. À cet égard, des valeurs du nombre de Reynolds plus éloignées et une plus grande variabilité des conditions expérimentales auraient sans doute mené à d'autres conclusions.

$$H \equiv 1/\overline{u'} \sqrt{\sum_{i=1}^n (u'_i - \overline{u'})^2 / (n - 1)}$$

Équation 5 - Facteur d'homogénéité (Liu, Ting, & Rankin, On the generation of turbulence with a perforated plate, 2004)

Où,

H : Facteur d'homogénéité

u' : Moyenne quadratique de u (m/s)

n : Nombre total de nœuds où les mesures ont été prises sur la section transversale du tunnel

Dans une autre étude, Liu et Ting (2007) ont réutilisé le même tunnel aérodynamique pour tester l'effet de l'épaisseur des plaques perforées et de la forme de trous sur la turbulence de l'écoulement. Les deux plaques qu'ils ont construites possédaient exactement la même solidité et le même diamètre de trous, soit respectivement 43% et 38.1 mm. Le patron des trous, qui consistait en un réseau de trous alignés diagonalement avec une distance de 45 mm entre leur centre, était également identique. La première plaque comportait des trous de forme conique avec un angle intérieur de 41° et une épaisseur de seulement 6 mm. La deuxième plaque possédait une épaisseur de 25.4 mm et des trous rectilignes. L'intensité relative de la turbulence en aval de la plaque, un paramètre qui est susceptible de favoriser les conditions de mélange, était en moyenne 25% supérieure dans le cas de la première plaque. Puisque les plaques, lorsque vues de face, sont en tout point identiques, ce phénomène est directement attribuable à la forme et à la longueur des orifices. Dans le cas des trous rectilignes, des zones de recirculation se forment entre la paroi solide et la *vena contracta*, soit le point dans un fluide où les lignes de courant sont les plus rapprochées et où la vitesse est maximale suite à une constriction de l'écoulement. Ce phénomène, illustré à la Figure 5, réduit la vitesse du fluide. Les zones de recirculation peuvent être évitées en adoptant la géométrie de la première plaque.

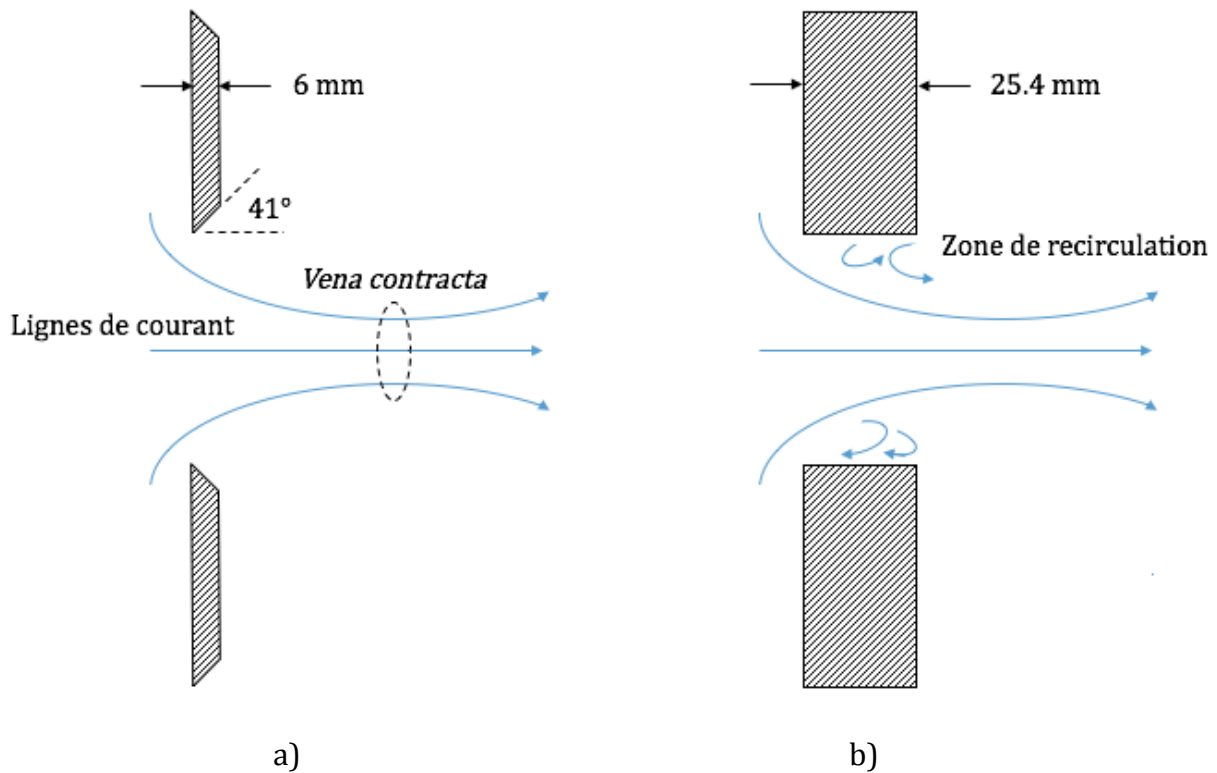


Figure 5 – Illustration des lignes de courant de l'écoulement passant à travers a) la plaque mince aux trous coniques et b) la plaque épaisse aux trous rectilignes (Liu & Ting, 2007)

2.4 Fluorescence induite par laser

La méthode d'acquisition des données privilégiée dans le cadre de ce projet s'appelle fluorescence induite par laser (FIL). Il s'agit d'une technique couramment utilisée pour la recherche en combustion, entre autres, car elle possède l'avantage de ne pas être intrusive à l'écoulement étudié en plus d'offrir une haute résolution temporelle et spatiale. Comme son nom le suggère, la FIL consiste à projeter un rayon laser vers un traceur fluorescent. Le tout se déroule dans une chambre noire absente de toute autre source lumineuse pouvant venir interférer les résultats. En absorbant la lumière provenant du laser, les électrons du traceur deviennent excités et atteignent un niveau d'énergie supérieur. Il s'en suit une radiation spontanée sous forme de libération d'un photon par le traceur. La longueur d'onde du photon

émis est supérieure à celle de la lumière incidente car une perte d'énergie a lieu durant le processus. Ce phénomène, appelé déplacement de Stokes, permet d'ailleurs de détecter en temps réel, avec une caméra, la lumière absorbée et aussitôt relâchée par les molécules du traceur fluorescent. Il est ensuite possible, à l'aide de l'Équation 6, de quantifier l'intensité lumineuse associée pour la convertir en mesures de concentration du traceur dans le fluide. Comme le phénomène se produit de façon spontanée, les mesures de concentration instantanées sont prises en continu afin de caractériser l'écoulement de façon temporelle. Pour ce qui est de l'échelle spatiale, il est possible d'obtenir un plan lumineux en élargissant le rayon laser au moyen de lentilles cylindriques (Dahm & Dimotakis, 1987; Guillard et al., 1998; Cai et al., 2011) ou en le scannant à l'aide d'un miroir rotatif (Gaskin, 1995; Villiermaux & Rehab, 2000; Perez-Alvarado, 2016). De cette manière, des images de FIL peuvent être captées sur l'ensemble de la zone d'intérêt plutôt que d'avoir seulement recours à des mesures ponctuelles. Lorsque tel est le cas, la méthode est plutôt référée à la fluorescence planaire induite par laser (FPIL).

$$I = \Phi_f I_0 (1 - e^{-\beta b C})$$

Équation 6 – Relation entre l'intensité lumineuse de la fluorescence émise par le traceur et la concentration du fluide ensemencé (Guilbault, 1973)

Où,

I : Intensité lumineuse de la fluorescence

C : Concentration du traceur dans le fluide

Φ_f : Efficacité quantique

I_0 : Puissance radiante de la lumière incidente

β : Absorptivité molaire

b : Longueur de la trajectoire d'une cellule

Lorsque des concentrations de traceur très diluées sont utilisées ($\beta b C \ll 1$), une approximation de Taylor de premier ordre peut être performée pour simplifier l'Équation 6,

qui se transforme alors en l'Équation 7. Cette dernière révèle que la concentration d'un fluide est directement proportionnelle à l'intensité lumineuse émise par le traceur fluorescent, à condition qu'il soit suffisamment dilué.

$$I = \Phi_f I_0 \beta b C$$

Équation 7 – Simplification de la relation entre l'intensité lumineuse de la fluorescence émise par le traceur et la concentration du fluideensemencé, lorsque celle-ci est très diluée

En ce qui concerne la source d'excitation, la plus commune consiste en un laser à argon ionisé, bien que le laser Nd:YAG (acronyme du nom anglais : *neodymium-doped yttrium aluminium garnet*) pulsé ait aussi été utilisé dans quelques récentes études (Sangl, 2014; Schumaker et Driscoll, 2012; Cai et al., 2011; Stöhr et al., 2011; Guillard et al., 1998).

Il existe plusieurs substances pouvant servir de traceur fluorescent. Pour les expériences liées à la recherche en combustion, les mesures sont généralement prises dans l'air et la visualisation a lieu soit grâce à l'ajout de vapeur d'acétone (Lozano et al., 1992; Krämer et al., 1999) lorsque l'étude porte sur les écoulements non réactifs ou soit par fluorescence induite sur les radicaux OH (Baumgartner et al., 2016; Wang et al., 2014; Galley et al., 2011; Stöhr et al., 2011; Boxx et al., 2010; Heeger et al., 2010; Meier et al., 2007) et CH (Tanahashi et al., 2008) des flammes produites par la combustion. Les mesures de FIL peuvent également être prises dans l'eau. La multitude de traceurs possibles inclut alors la fluorescéine (Dahm et Dimotakis, 1990; Saylor et Sreenivansan, 1998), la sulfurdhodamine 101 (Lavertu, 2008), la rhodamine 6G (Gaskin & Wood, 2001) et les particules de polyamide (Sangl et al., 2014).

La fluorescence émise par le traceur utilisé peut être détectée grâce à un photodiode (Koochesfahani, 1984; Dowling et Dimotakis, 1990), un tube photomultiplicateur (Saylor et Sreenivansan, 1998; Lavertu et al., 2008) ou une caméra avec dispositif à transfert de charges, souvent appelée CCD en raison de son acronyme anglais *charge coupled device* (Sangl et al., 2014; Gaskin, S., 1996; Villiermaux et al., 2000; Cai et al., 2011; Perez-Alvarado, 2016).

La technique de FIL étant relativement récente et répandue, des chercheurs tentent continuellement de l'améliorer afin de diminuer les sources d'erreurs qui s'y rattachent. Par exemple, Walker (1987) et Lavertu (2008) se sont intéressés au phénomène d'atténuation de la puissance du laser qui se produit lorsque le traceur fluorescent absorbe l'énergie incidente. Ils sont tous les deux parvenus à tirer la même conclusion, soit que le traceur devrait être dilué à des concentrations d'approximativement 10^{-7} M pour mitiger le problème. Walker a aussi étudié l'effet de la puissance du laser, du pH du solvant et de la température du solvant sur la fluorescence émise par le traceur. Pour ce faire, il a utilisé la fluorescéine comme traceur qui a été dissout dans l'eau et illuminé par un laser à argon ionisé. Ses travaux ont révélé que la fluorescence émise augmentait de manière directement proportionnelle à la puissance du laser pour des valeurs se situant entre 0 et 0.3 W. Pour ce qui est de la température de l'eau, son effet était négligeable puisqu'un changement de 1°C réduisait d'environ 1% la fluorescence émise par le traceur. Le pH du solvant, quant à lui, avait une forte incidence sur la fluorescence émise. Pour réduire la sensibilité des résultats face à ce paramètre, Walker recommande l'utilisation d'une solution tampon dont le pH est supérieur à 8.5 pour conduire des expériences de FIL.

Le photoblanchiment représente une autre source d'erreur rencontrée lors des expériences de FIL. En effet, l'exposition prolongée d'un traceur à l'irradiation d'un laser cause progressivement sa perte de fluorescence. Plutôt que d'émettre un photon et retourner à son état excitable, un traceur qui demeure excité trop longtemps finit par s'engager dans une réaction photochimique irréversible qui l'empêche de retourner à son état initial. Pour étudier ce phénomène, Saylor (1995) a conduit une série d'expériences en utilisant la fluorescéine comme traceur. Ce dernier était dissout dans l'eau à des concentrations diluées de 10^{-6} M et un laser à argon ionisé dont la puissance de sortie correspondait à 1 W servait de source d'excitation lumineuse. Une réduction de 50% de l'intensité lumineuse de la fluorescence émise a été mesurée après environ 10 ms d'irradiation constante. Avec un temps d'exposition au laser de 20 ms, soit le double, et l'utilisation d'un laser plus puissant, Lavertu (2008) a également observé une réduction de 50% de la fluorescence émise par le même traceur. Dans tous les cas, malgré les disparités,

le photoblanchiment a été identifié comme une source d'erreur importante aux mesures de FIL et un phénomène réversible dont les effets peuvent être atténués par l'utilisation d'un laser pulsé plutôt qu'un laser à ondes continues, la diminution de la puissance du laser, l'augmentation du débit d'écoulement et la dilution de la concentration du traceur fluorescent.

Chapitre 3 : Méthodologie

Les principes fondamentaux liés aux turbines à gaz dérivées des réacteurs aéronautiques ont été présentés au chapitre 1. De plus, le procédé de combustion à mélange préalable pauvre a été différencié de celui à flamme de diffusion et identifié comme une technique standard employée par les manufacturiers d'équipement afin de contrôler les émissions de NO_x . Ce chapitre présentera d'abord certaines caractéristiques et méthodes opérationnelles assurant le succès des chambres de combustion à mélange préalable pauvre. Le processus de conception ayant mené à la réalisation du prototype expérimental et de son système hydraulique sera ensuite décrit.

3.1 Critères de conception des chambres de combustion à mélange préalable pauvre en combustible

À titre de rappel, la combustion à mélange préalable pauvre est un procédé qui consiste à mélanger le combustible avec l'air avant l'allumage de la flamme. Les chambres de combustion utilisant un tel procédé opèrent généralement sous des conditions où le rapport combustible/air correspond approximativement à la moitié de la valeur requise pour former un mélange stœchiométrique (Bender, 2006). En d'autres mots, il y a typiquement deux fois plus d'air fourni au mélange qu'il en faudrait à la réaction chimique pour brûler tout le combustible. L'excès d'air vise à limiter la formation de NO_x par voie thermique en refroidissant la température de la flamme. D'un point de vue théorique, maintenir les conditions du mélange de façon à ce qu'il demeure à la fois pauvre en combustible et homogène peut sembler assez simple. Or, plusieurs défis majeurs liés à l'application de cette stratégie de contrôle des polluants s'imposent en pratique. Encore une fois, il y a inévitablement des compromis à faire entre plusieurs objectifs conflictuels, soit la flexibilité d'opération du moteur, son efficacité en terme de conversion énergétique, de même que ses

émissions de polluants. Ceux-ci seront abordés dans la section en cours, tout comme leurs impacts sur la conception des chambres de combustion à mélange préalable pauvre en combustible.

3.1.1 Problèmes opérationnels à éviter

Bien entendu, les turbines à gaz doivent pouvoir opérer sous une large gamme de conditions d'utilisation tout en maintenant des niveaux de performance raisonnables. Cette flexibilité d'opération devient d'autant plus importante lorsque les turbines sont employées pour des applications qui requièrent plus fréquemment des cycles de mise en marche et d'arrêt ou lorsqu'elles sont soumises à des charges mécaniques intermédiaires durant des périodes prolongées, comme c'est le cas pour le type de moteur à l'origine de cette étude. La notion de charge mécanique, au sens strict, correspond au poids supporté par les surfaces d'appui de la turbine. À cet égard, l'augmentation de la vitesse de rotation d'une turbine a pour effet d'augmenter sa puissance de sortie, mais également la charge mécanique qu'elle supporte. Chaque turbine à gaz possède une charge de base recommandée par le fabricant afin d'éviter que ses pièces les plus sollicitées s'endommagent de façon prématurée. En effet, l'application d'une charge mécanique trop faibles ou trop élevée cause la déstructuration, voire même la rupture des matériaux à long terme, réduisant ainsi la durée de vie utile du moteur. De plus, la variation des charges mécaniques affecte considérablement les temps de réaction dans la chambre de combustion en modifiant le débit d'air à l'entrée de la turbine, la pression et la température. Il importe que le temps de résidence du mélange dans la chambre de combustion surpasse l'échelle de temps requise pour compléter la réaction entre l'air et le combustible, faute de quoi la flamme risque de se détacher et de s'éteindre, un phénomène dynamique mieux connu sous son appellation anglaise *blowoff*. Bien que le temps de réaction soit surtout dicté par les conditions opérationnelles, la conception de la chambre de combustion joue quant à elle un rôle important sur le temps de résidence des réactifs. Ce dernier varie en fonction de plusieurs paramètres tels que la force des tourbillons générés par les dispositifs à vrille et la taille du brûleur.

L'utilisation d'un mélange inflammable d'air et de combustible en amont de la chambre de combustion entraîne le risque qu'un retour de flamme, un phénomène étant généralement désigné par le terme *flashback*, se produise. Comme son nom le suggère, il s'agit en fait de la pénétration indésirable des flammes dans le brûleur, qui résulte en combustion dans la zone de prémélange. Un retour de flamme survient lorsque la vitesse locale de cette dernière excède la vitesse d'approche du mélange en amont, offrant ainsi l'opportunité à la flamme de se propager à l'intérieur du brûleur jusque dans la zone de prémélange et d'enflammer le combustible qui s'y trouve (Benim & Syed, 2014). Une fois la flamme introduite dans la zone de prémélange, elle est exposée à des conditions locales plus turbulentes et des concentrations de combustible se rapprochant des valeurs stœchiométriques, comparativement à l'entrée de la chambre de combustion située en aval où l'écoulement est mieux mélangé et plus laminaire. De ce fait, il arrive que la flamme s'ancre dans la zone de prémélange et y demeure sans s'éteindre une fois les conditions normales rétablies. Le cas échéant, il s'ensuit des émissions de NO_x accrues et l'endommagement du brûleur. Par conséquent, la conception des chambres de combustion à mélange préalable pauvre doit assurer que la vitesse de la flamme n'excède jamais la vitesse du mélange d'air et de combustible en amont afin d'éviter la propagation de la flamme qui est à l'origine des *flashbacks*. Dans l'éventualité où les conditions stables sont perturbées et qu'un retour de flamme se produit, comme lors des périodes d'opération transitoires causant une décharge rapide de la turbine à gaz ou un décrochage de son compresseur, par exemple, la conception doit assurer que la flamme ne puisse s'ancre et se stabiliser dans les zones indésirables.

Un autre problème lié au mélange préalable pauvre comme stratégie d'abattement des NO_x est l'autoallumage du combustible avant son entrée dans la chambre de combustion. Bien que les conséquences de l'autoallumage soient similaires à celles d'un *flashback*, c'est-à-dire la combustion indésirable du combustible dans la zone de prémélange, les deux phénomènes se distinguent par leurs mécanismes de formation. En effet, l'autoallumage consiste plutôt à l'allumage spontané du combustible sans étincelle ou retour de flamme. L'état thermodynamique du système, au sein duquel la chaleur libérée par les réactions ayant lieu est suffisante pour activer et maintenir la combustion du combustible, est

responsable du phénomène d'autoallumage. À pression donnée, il existe une température d'autoallumage propre à chaque mélange d'air et de combustible qui réfère à la température par-dessus laquelle le mélange allumera de façon spontanée, à condition que ce dernier dispose d'un délai suffisant. Le temps requis au mélange pour s'allumer, une fois la température d'autoallumage atteinte, est communément appelé délai d'autoallumage et peut varier entre une centaine de microsecondes allant jusqu'à plusieurs secondes (Glassman & Yetter, 2008). La combustion à mélange préalable pauvre requiert, entre autres, des temps de résidence relativement élevés pour que l'air et le combustible puissent former un mélange homogène avant d'atteindre la chambre de combustion. Or, l'autoallumage du mélange aura lieu si son temps de résidence dépasse son délai d'autoallumage, en assumant que la température du brûleur excède également la température d'autoallumage. Ainsi, une conception à la fois sécuritaire et efficace doit permettre à l'air et au combustible de demeurer suffisamment longtemps pour bien se mélanger sans toutefois s'autoallumer. Puisque l'augmentation subite de la température de l'air et du combustible peut également mener à l'autoallumage du mélange, il prévaut que la conception du système limite autant que possible toutes formes d'échange de chaleur. Sans qu'il s'agisse directement d'un retour de flamme, il arrive qu'une quantité suffisante d'énergie soit transférée par radiation aux parois du brûleur de sorte qu'elles parviennent ultimement à autoallumer le mélange d'air et de combustible par convection thermique (Kulkarni, 2007). Le délai et la température d'autoallumage sont aussi fortement dépendants de la composition du combustible.

3.1.2 Stratégies existantes

Sans surprise, la conception d'une chambre de combustion peu polluante étant capable de maintenir la température des flammes basses sous l'étendue des conditions d'opération de la turbine à gaz représente un défi de taille pour les fabricants d'équipement d'origine. Par conséquent, ces derniers ont développé des systèmes à combustion étagée qui s'avèrent maintenant pratique courante dans l'industrie. Ce type de combustion utilise plusieurs étages d'injecteurs de combustible opérés individuellement pour permettre l'ajustement local du rapport combustible à chaque point d'injection selon les besoins

désirés. De façon générale, plus il y a d'étages et d'injecteurs de combustible indépendants, mieux la température de la flamme peut être contrôlée. À titre d'exemple, les composantes de la chambre de combustion étagée *GE DLN-1* développée par la compagnie General Electric sont présentées à la Figure 6. Il est à noter que l'objectif de cet exemple consiste à illustrer les principales caractéristiques et modes d'emploi des systèmes à combustion étagée et non les particularités propres au système choisi. Le gaz naturel employé comme combustible est injecté à deux niveaux le long de la trajectoire de l'écoulement, formant ainsi deux zones distinctes où les flammes peuvent être contrôlées dans le brûleur. Par définition, la zone primaire correspond à la portion du conduit où la réaction de combustion est amorcée, suite au mélange entre le combustible et l'air. La zone secondaire représente l'endroit où les produits de combustion à haute température provenant de la zone primaire sont mélangés avec l'air restant du compresseur pour produire un mélange à température moins élevée et plus uniforme.

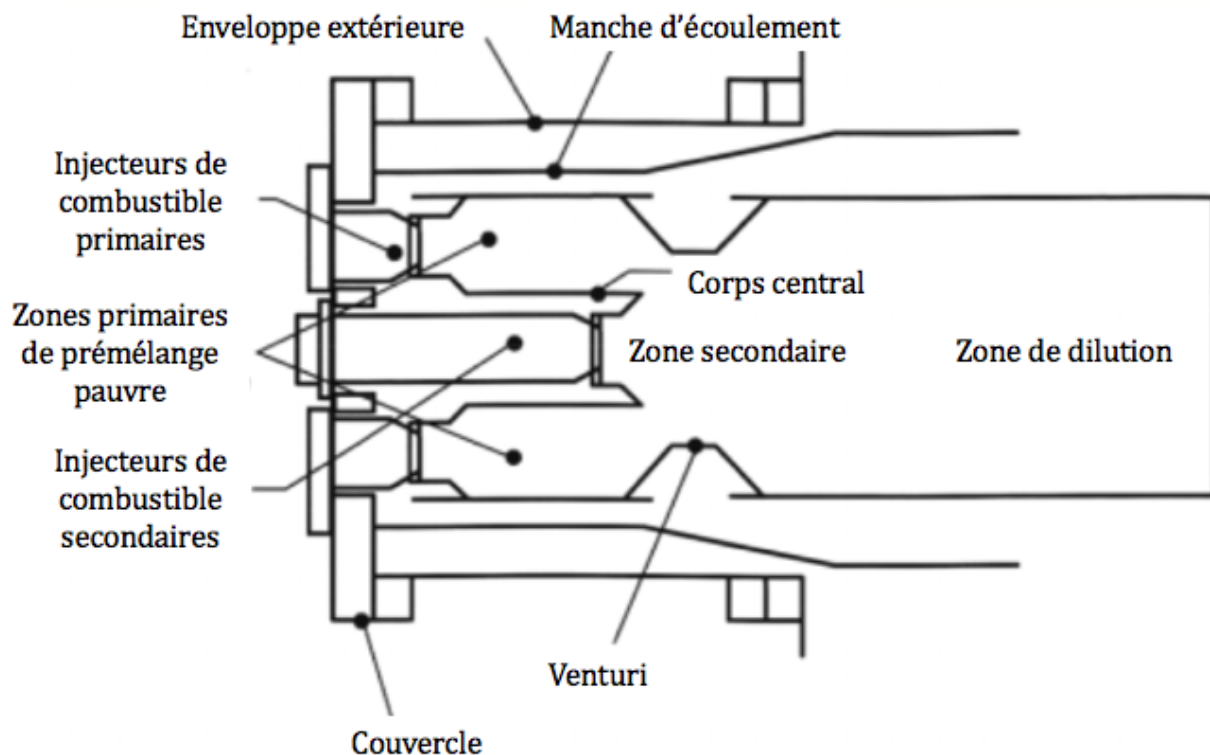


Figure 6 – Section transversale de la chambre de combustion étagée *GE DLN-1* (*Dry Low NO_x*) montrant ses principales composantes (Davis & Black, 2000)

L'opération séquentielle des injecteurs de combustible, six primaires et un secondaire, offre une infinité de possibilités pour pallier aux changements liés à la charge mécanique, à la composition du combustible et aux autres conditions d'opération. Le système *GE DLN-1* emploie ainsi quatre différents modes opératoires selon la charge mécanique supportée par la turbine à gaz. Encore une fois, une attention particulière doit être portée sur les principes fondamentaux sur lesquels reposent ces différents modes plutôt que sur les détails spécifiques qu'ils comportent. Fait intéressant, les trois premiers modes opératoires ont recours à une flamme de diffusion où les réactants ne sont pas mélangés à priori. La combustion à mélange préalable pauvre, apparaissant à la Figure 7, a seulement lieu lorsque la charge mécanique est suffisamment proche de la valeur de base pour laquelle la turbine à gaz a été conçue. Il s'agit du seul mode opératoire où une partie du combustible est injectée dans la zone primaire sans qu'il y ait combustion immédiate. De cette manière, la zone primaire se transforme en zone de prémélange et la flamme est seulement allumée dans la zone secondaire. C'est le scénario qui réduit au maximum les émissions de NO_x et CO .

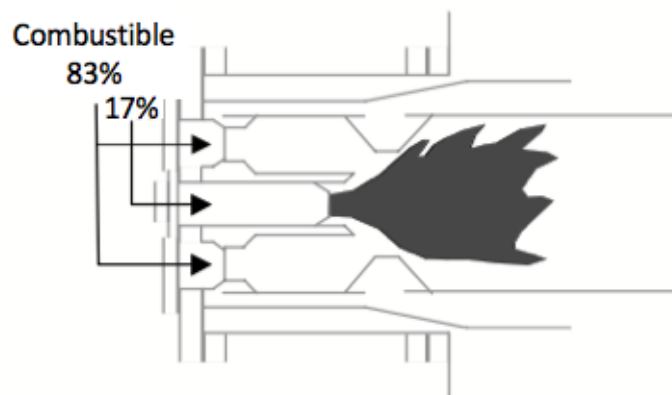


Figure 7 - Mode opératoire prémélangé du système à combustion étagée GE DLN-1, privilégié pour les charges mécaniques entre 50 et 100% de la valeur de base (Davis & Black, 2000)

La Figure 8 correspond à la configuration utilisée à partir des cycles de démarrage du moteur jusqu'à ce que la charge mécanique atteigne une valeur d'environ 20% de la charge de base. Tel qu'observé, tout le combustible est alors injecté dans la zone primaire seulement. Ce choix s'explique par le besoin de stabiliser la flamme primaire, c'est-à-dire que sa température doit être maintenue suffisamment haute pour éviter que des conditions de

détachement de la flamme suivi de son extinction se produisent. En contrepartie, l'élévation de la température des flammes favorise la formation de NO_x par voie thermique. Ce mode opératoire offre des performances similaires à un système avec combustion par flamme de diffusion en terme d'émissions de CO et de NO_x .

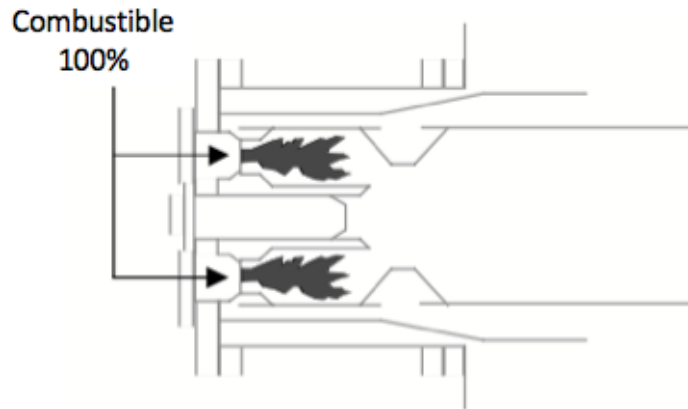


Figure 8 - Mode opératoire primaire du système à combustion étagée GE DLN-1, privilégié pour les charges mécaniques entre 0 et 20% de la valeur de base (Davis & Black, 2000)

La Figure 9 réfère au mode opératoire appelé pauvre-pauvre, où l'injection du combustible est répartie sur les deux étages. Il s'agit du mode préférentiel pour les charges mécaniques intermédiaires qui se situent entre 20 et 50% de la charge de base. Le temps de résidence pour la flamme secondaire est écourté comparativement aux flammes primaires. Ainsi, l'efficacité de conversion du CO en CO_2 est diminuée et les émissions de CO sont plus importantes. La flamme secondaire reçoit volontairement un apport plus faible en combustible car sa température doit être plus basse que la flamme primaire. Son rôle consiste justement à réduire la formation de NO_x par voie thermique ainsi qu'à consommer le CO et les autres produits de combustion formés dans la zone primaire. De son côté, la flamme primaire vise à assurer la flexibilité du moteur en s'adaptant aux différentes conditions d'opération auxquelles il est soumis.

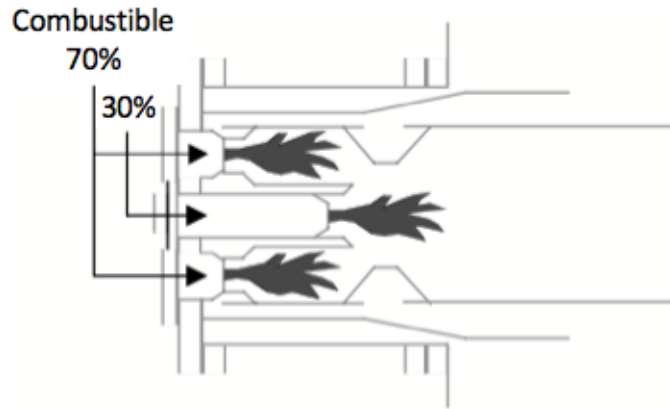


Figure 9 - Mode opératoire pauvre-pauvre du système à combustion étagée GE DLN-1, privilégié pour les charges mécaniques entre 20 et 50% de la valeur de base (Davis & Black, 2000)

Finalement, le mode opératoire secondaire, illustré à la Figure 10, sert uniquement de transition entre les modes pauvre-pauvre et prémélangé. Tout le combustible est alors injecté dans la zone secondaire afin que les flammes présentes dans la zone primaire s'éteignent. Cette étape est nécessaire en vue de pouvoir distribuer le combustible dans la zone primaire sans que le mélange s'enflamme. Il faut cependant limiter la durée pendant laquelle ce mode est employé puisqu'il entraîne à la fois des émissions élevées de CO et de NO_x.

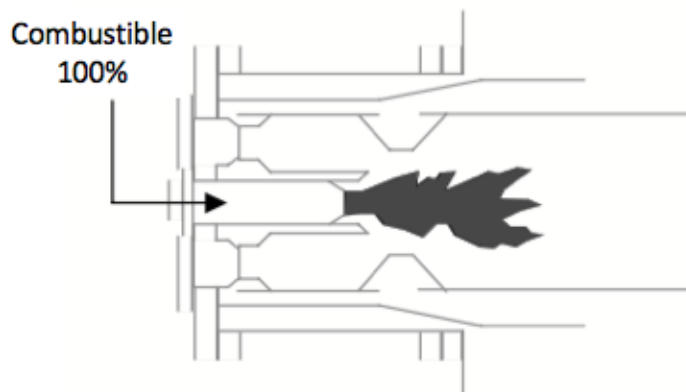
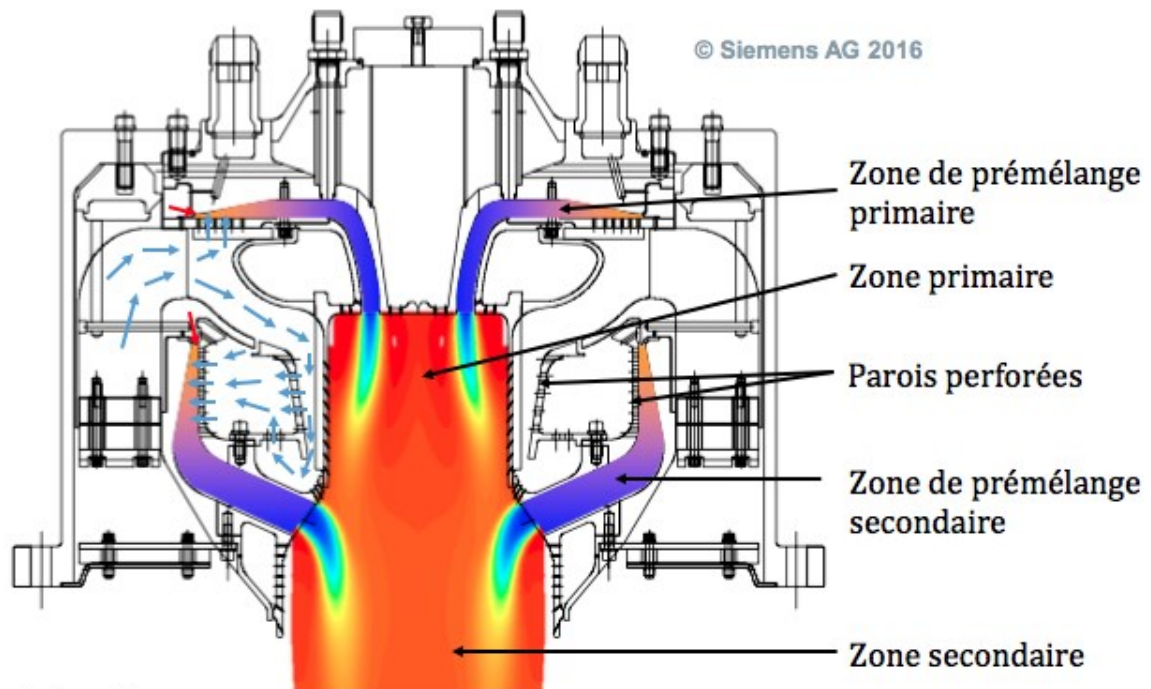


Figure 10 - Mode opératoire secondaire du système à combustion étagée GE DLN-1, nécessaire à la transition entre les modes pauvre-pauvre et prémélangé (Davis & Black, 2000)

Tel que discuté, la technique de combustion étagée est souvent requise en complément à la combustion à mélange préalable pauvre en combustible, lorsque celle-ci est utilisée comme approche globale pour réduire les émissions de NO_x . Il a été vu comment l'opération séquentielle des injecteurs de combustible permettait de minimiser la température des flammes de façon locale, et donc la formation de polluants, sous toute la gamme des charges mécaniques auxquelles la turbine à gaz est soumise sans compromettre sa flexibilité d'opération. Les principes fondamentaux de la stratégie ayant été survolés, il faut maintenant souligner à nouveau la sensibilité des systèmes de combustion à mélange préalable pauvre en combustible face à la qualité du mélange des réactants. Pour optimiser celle-ci, les chambres de combustion doivent être munies de composantes favorisant la création de zones turbulentes et la distribution adéquate de l'air. Les temps de résidence prolongés ont aussi pour effet d'améliorer la qualité du mélange, mais ils sont majoritairement dictés par les conditions opérationnelles de la turbine plutôt que par la conception de sa chambre de combustion. À titre de rappel, le prémélange entre l'air et le combustible se produit en seulement quelques millisecondes, d'où l'importance d'avoir une configuration optimale et un souci des moindres détails pour chaque élément du système. Évidemment, le réseau de distribution d'air dans une turbine à gaz s'avère extrêmement complexe. Puisque la portée de ce projet couvre seulement les zones de prémélange, l'exemple qui suit met uniquement l'accent sur le cheminement d'air et de combustible au sein d'une chambre de combustion étagée à mélange préalable pauvre, plutôt que dans l'ensemble du système. Voici donc, à la Figure 11, une coupe transversale montrant la configuration interne de la chambre de combustion de la turbine à gaz *SGT-A65 TR* développée par la compagnie Siemens. Les couleurs sur la figure font référence à la température des flammes; les couleurs chaudes correspondent aux températures plus élevées alors que les couleurs froides sont associées aux températures plus faibles.



Légende:

- Points d'injection du combustible
- Cheminement de l'air dans la chambre de combustion

Figure 11 – Coupe transversale montrant le profil 2D de la chambre de combustion de la turbine SGT-A65 TR développée par la compagnie Siemens (Siemens, 2014)

On peut y voir comment l'air provenant du compresseur est acheminé jusqu'aux zones de prémélange en passant par des canaux aux formes sinueuses ainsi qu'à travers des parois perforées. Les canaux sont ainsi conçus pour limiter les zones de recirculation et les chemins préférentiels. Les parois perforées comportent des trous dont la disposition, le nombre, la forme, la taille, l'inclinaison et toutes autres particularités visent à améliorer la distribution d'air. Puisqu'il s'agit de l'objet de cette étude, ce sujet sera approfondi davantage lors de la prochaine section du présent chapitre. Le réseau de distribution d'air se rend aux deux zones de prémélange qui sont alimentées en combustible de manière indépendante par des injecteurs propres à chacune d'entre elles. Le rapport combustible/air est donc contrôlé par ces injecteurs de combustible. À titre informatif, la turbine SGT-A65 TR utilise du gaz naturel comme source d'énergie. Au total, il y a 16 injecteurs de combustible au deuxième

étage du système, donnant lieu à autant de zones de prémélange secondaires réparties de façon radiale autour du conduit de combustion. Ce détail n'étant pas visible à la Figure 11, une autre coupe transversale montrant le profil en 3D de la chambre de combustion du même système est présentée à la Figure 12. Aucun nouvel élément n'apparaît sur la figure mis à part la prolongation du conduit de combustion et une partie de l'enveloppe extérieure qui constitue la structure de confinement de la pression qui règne au sein du brûleur. Il est toutefois possible de mieux y distinguer la séparation des zones de prémélange, surtout celles secondaires. Tel qu'observé, les 16 compartiments identiques débouchent chacun sur la zone secondaire grâce à une ouverture trapézoïdale.

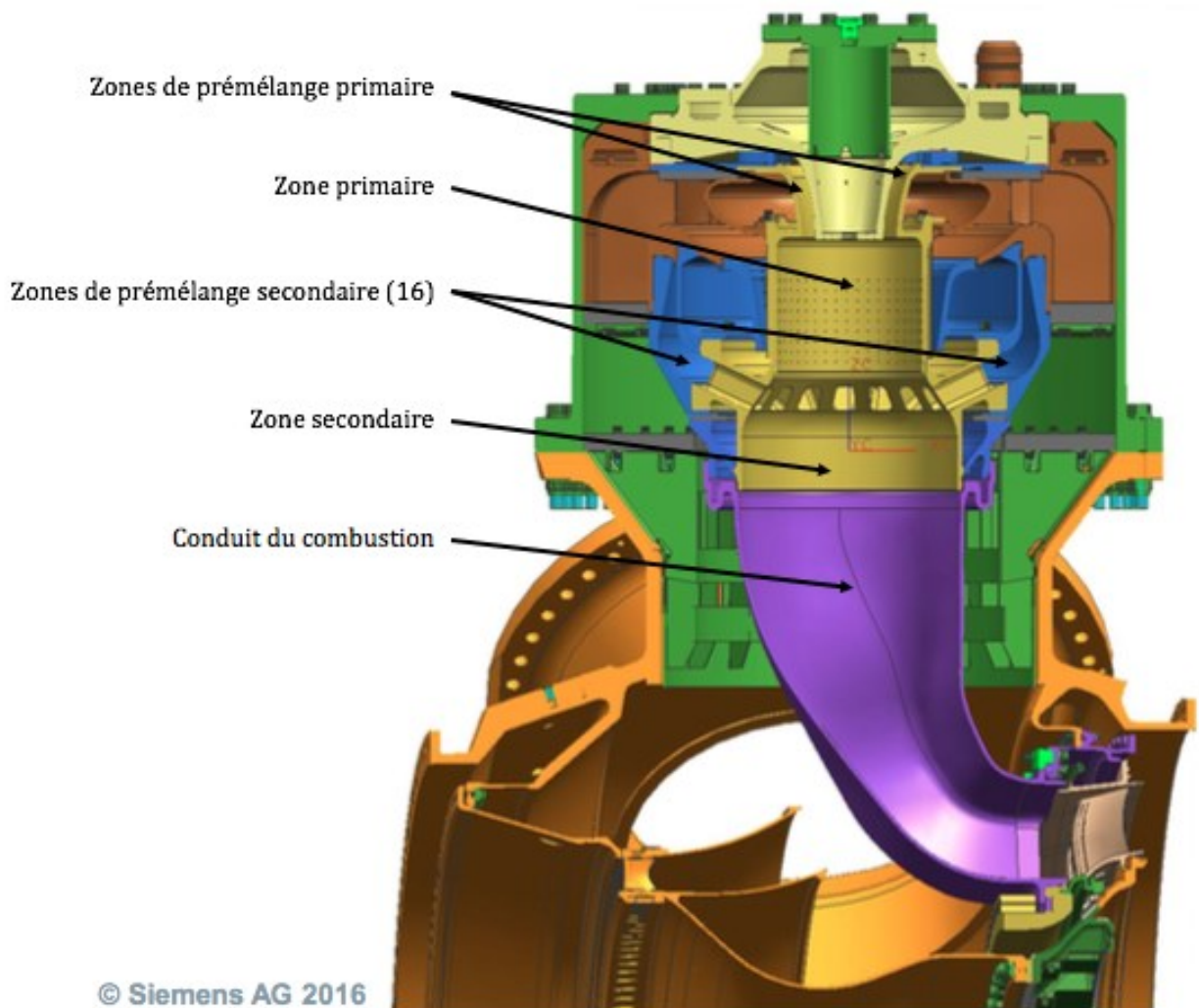


Figure 12 - Coupe transversale montrant le profil 3D de la chambre à combustion de la turbine SGT-A65 TR développée par la compagnie Siemens (Jetté, 2016)

Sans vouloir expliquer chaque composante de la turbine à gaz pour le système choisi, il est intéressant de savoir qu'il comporte au total huit chambres de combustion réparties de façon radiale autour de son centre, à la manière de la Figure 13. Cet exemple démontre bien que la modification d'un léger détail dans la zone de prémélange secondaire, aussi anodine puisse-t-elle sembler à priori, est potentiellement répétée à 16 reprises dans chacune des huit chambres de combustion. De cette manière, une amélioration mineure se voit multipliée 128 fois, amplifiant ainsi considérablement son effet.

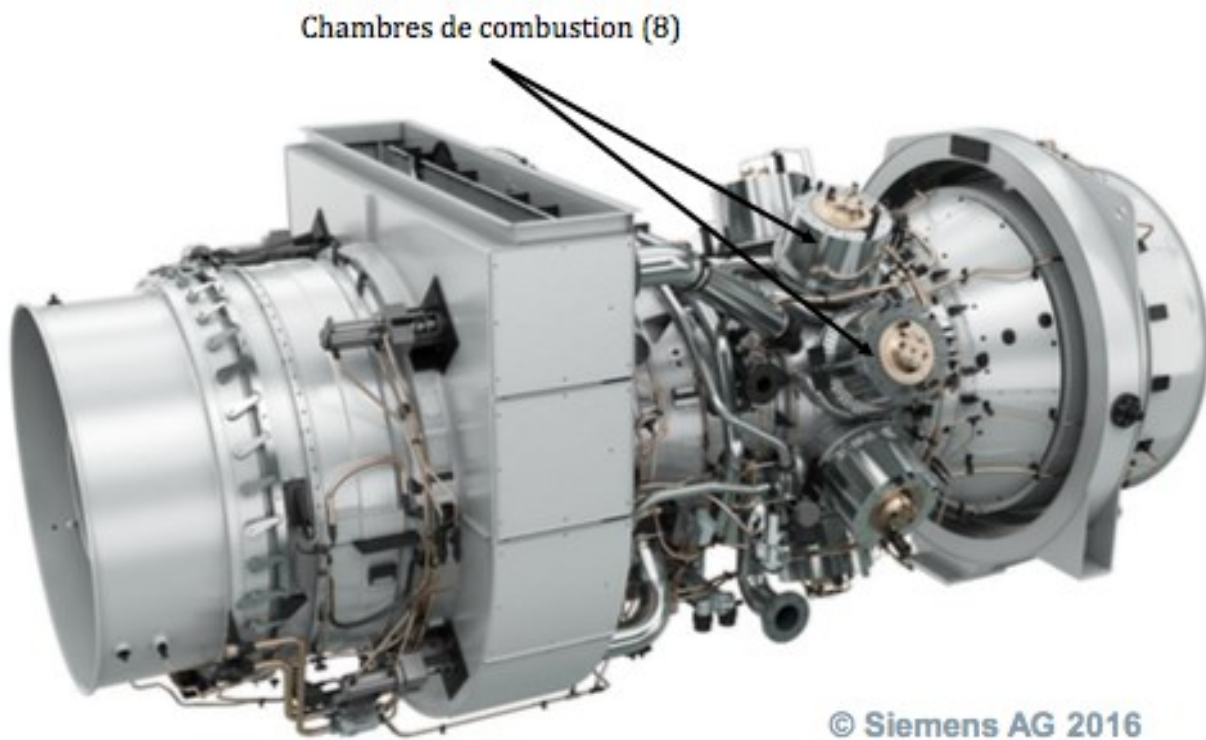


Figure 13 – Turbine à gaz SGT-A65 TR développée par la compagnie Siemens (Siemens, 2014)

Les objectifs de cette section étaient, dans un premier temps, de présenter les défis liés à la conception d'un système de combustion à mélange préalable pauvre en combustible et puis, en deuxième lieu, de montrer les stratégies couramment employées par les fabricants d'équipement d'origine pour surmonter ceux-ci. Plus spécifiquement, la combustion étagée a été identifiée comme technique standard afin d'opérer un système de combustion à

mélange préalable pauvre avec flexibilité tout en maintenant ses émissions de polluants à des niveaux acceptables. Des exemples ont été employés en vue d'identifier leurs modes de fonctionnement et principales caractéristiques. Un accent particulier a été mis sur l'importance du réseau de distribution d'air dans le but d'assurer la qualité du mélange entre l'air et le combustible avant leur combustion pour ainsi limiter les émissions de NO_x résultantes.

3.2 Processus de conception du montage expérimental

La section qui suit décrit les étapes de conception ayant menées à la réalisation du prototype expérimental et du système hydraulique qui l'alimente. À prime abord, les contraintes physiques associées au processus de conception, de même que les décisions qui en découlent, sont énumérées. Par la suite, plutôt que d'expliquer toutes les étapes d'un long processus itératif en ordre chronologique, les éléments composant la solution finale ayant été retenue seront présentés.

3.2.1 Survol des contraintes à respecter

Afin de reproduire les conditions de mélange réelles, il était essentiel de conserver autant que possible la configuration réelle la zone de prémélange secondaire lors du processus de conception du montage expérimental. Idéalement, le prototype aurait été identique à la vraie chambre de combustion pour offrir une représentation parfaite de la réalité, mais certaines modifications s'imposaient pour des raisons pratiques.

D'abord, le système devait satisfaire les exigences imposées par la méthode d'acquisition des données employée, soit la FPIL. Parmi elles, un accès visuel à l'intérieur de la zone d'intérêt était nécessaire en vue de pouvoir simultanément illuminer le mélange à l'aide du laser et prendre des photos avec la caméra. Pour éviter la distorsion des images

obtenues, par souci d'interprétation des résultats, et pour assurer un meilleur contrôle des réfractions du laser, par mesures de sécurité, il était préférable que les surfaces extérieures du prototype soient planes. De plus, puisqu'il a été convenu que l'air et le combustible composant le mélange soient remplacés par de l'eau pour cette étude, un sujet qui sera discuter plus en profondeur à la prochaine section, il fallait que le prototype soit étanche et puisse résister à la pression exercée par l'écoulement d'eau en turbulence. Il devait également être muni d'un accès physique rapide et d'un système d'insertion efficace pour changer les pièces amovibles entre les différents essais réalisés. En raison des contraintes budgétaires, il prévalait aussi de limiter les dépenses pour l'ensemble du projet, incluant l'achat des matériaux de construction et l'équipement de laboratoire, de même que les frais de main d'œuvre. Le prix était souvent un facteur déterminant dans la justification de certaines décisions conceptuelles. Il fallait également que la taille du prototype soit la plus compacte possible en raison de l'espace restreint dans le local où se déroulait les expériences. En vue de faciliter les manipulations, il convenait d'avoir un dispositif léger. Les procédés de fabrication utilisés, à savoir l'usinage des pièces en atelier et l'impression des plaques en 3D, entre autres, impliquaient une série de nouvelles contraintes. En effet, il s'avère impossible de former des coins à angles droits en utilisant une perceuse à colonne pour forer un matériau. Ainsi, toutes les formes modélisées possèdent des coins intérieurs qui sont arrondis avec un rayon de courbure correspondant à la grosseur de la mèche ayant été employée. Il existe évidemment une longueur limite aux mèches disponibles. En général, plus le matériau à forer est épais, plus la mèche devient grosse et couteuse. De leur côté, les imprimantes 3D sont limitées quant aux choix des matériaux et à la taille des objets.

3.2.2 Choix des réactants

Plusieurs raisons justifient le choix de remplacer l'air et le combustible par de l'eau pour les expériences. Premièrement, les conditions opérationnelles d'une chambre de combustion sont extrêmement difficiles à reproduire. En effet, les flammes de la zone primaire, qui sont plus chaudes que celles de la zone secondaire, atteignent généralement des températures situées entre 1600 et 2000 K pour les chambres de combustion à mélange

préalable pauvre en combustible, tandis que l'air est comprimé à des taux avoisinant 40: 1 (Igoe, 2008). C'est donc dire que la pression est jusqu'à 40 fois plus élevée à la sortie du compresseur, lorsque l'air atteint la chambre de combustion, qu'à l'entrée du compresseur. Afin de remettre les choses en perspectives, il a été mentionné que 2000 K constituait un seuil typique des flammes de diffusion au-delà duquel les valeurs d'oxydes d'azote formées dépassent généralement les limites tolérées. Bref, reproduire de telles conditions en laboratoire requiert de l'équipement sophistiqué et représente un défi de taille. Outre la complexité de la tâche, la manipulation d'un mélange inflammable sous de telles conditions présente un risque d'explosion. Dans un milieu confiné, le gaz naturel peut se substituer à l'oxygène de l'air inhalé pour agir comme un gaz asphyxiant. De plus, la combustion à mélange préalable pauvre mène inévitablement à la production de monoxyde de carbone. L'exposition à ce gaz incolore et inodore peut entraîner une mort rapide car il est immédiatement absorbé par le système sanguin et prive le corps d'oxygène, même si la concentration de monoxyde de carbone dans l'air est faible (MSSS, 2018). La substitution des gaz par de l'eau constitue un choix beaucoup plus sécuritaire. En termes d'approvisionnement, l'eau est disponible gratuitement en quantité virtuellement illimitée à même le réseau de distribution d'eau potable de la ville qui est raccordé au laboratoire alors que le gaz naturel s'avère nettement plus difficile et dispendieux à se procurer, en plus d'être dangereux à manipuler. Il faut aussi rappeler que l'étude s'intéresse seulement à la qualité du mélange d'air et de combustible avant leur combustion, ce qui signifie qu'il n'y a nul besoin de reproduire la combustion en soi lors des expériences. Un mélange non réactif à des températures ambiantes suffit.

Bien que justifié, le choix de remplacer les réactants par de l'eau comporte des inconvénients. Les gaz ont des propriétés physiques différentes de celles des liquides. D'un point de vue microscopique, les particules composant un gaz sont très éloignées les unes des autres et se déplacent librement à grande vitesse. Pour ce qui est des particules d'un liquide, elles sont liées par des forces d'attraction plus importantes qui les rapprochent entre elles sans toutefois leur procurer une structure ordonnée. Elles sont également en perpétuelle agitation, mais se déplacent beaucoup plus lentement que les particules d'un gaz. De plus, contrairement aux liquides, les corps gazeux sont compressibles et expansibles. Ils occupent

donc tout l'espace qui leur est offert. Malgré que les gaz et les liquides possèdent des propriétés intrinsèques différentes, il est possible de faire en sorte que l'état de l'écoulement de l'eau utilisée lors des expériences soit le même que celui de l'air et du combustible retrouvé dans la turbine en opération, soit un régime turbulent. Du moment que le nombre de Reynolds est suffisamment élevé, les propriétés moléculaires du fluide ne contrôlent pas les caractéristiques des écoulements turbulents; la dynamique de la turbulence est effectivement la même pour tous les fluides, qu'ils soient liquides ou gazeux (Tennekes & Lumley, 1972). En d'autres mots, des fluides aux propriétés physiques différentes vont se comporter de façon similaire à des nombres de Reynolds comparables en ajustant les dimensions du montage et les vitesses d'écoulements. Sous la base de ce principe, il est possible d'étudier le mélange entre deux gaz en les substituant par des liquides, à condition que leur état d'écoulement soit turbulent et que leurs vitesses relatives demeurent inchangées. Si elles parviennent à optimiser le mélange simulé avec de l'eau en turbulence, les améliorations apportées à la configuration interne de la chambre de combustion auront aussi pour effet d'homogénéiser le mélange entre l'air et le combustible, du moins jusqu'à un certain degré.

La transition d'un régime laminaire à turbulent n'est pas instantanée. À partir d'un certain nombre de Reynolds, des instabilités apparaissent et augmentent progressivement avec les nombres de Reynolds subséquents jusqu'à l'atteinte d'un régime d'écoulement turbulent pleinement développé, qui se caractérise par un comportement chaotique. La zone de transition entre les régimes laminaire et turbulent varie d'une référence à l'autre. Bien qu'il soit généralement admis que le seuil de la turbulence correspond à un nombre de Reynolds d'environ 4,000, certaines sources affirment que la turbulence n'est pas pleinement développée tant que le nombre de Reynolds est inférieure à 10,000 (Liptak, 1995). Il s'agit donc de la valeur choisie dans le cadre de cette étude pour assurer l'absence de zones non turbulentes au sein de l'écoulement qui règne lors des expériences.

En plus des différences ayant été mentionnées préalablement et pour lesquelles des mesures de correction ou de prévention ont été prises, les conditions retrouvées dans la vraie chambre de combustion occasionnent un gradient de température entre les deux

fluides mélangés. D'autre part, le phénomène de diffusion est beaucoup plus important dans les écoulements gazeux que liquides. Il se peut que ces paramètres aient une incidence sur le mélange, mais il a été jugé que leurs effets étaient négligeables et ne méritaient pas d'être pris en compte dans le présent montage expérimental qui vise plutôt l'étude des phénomènes dynamiques.

Dans la chambre de combustion à l'étude, le ratio des vitesses auxquelles l'air et le gaz naturel sont respectivement injectés est de 4: 3. Tel que mentionné, il est important de respecter le même ratio de vitesses entre l'eau simulant l'air et l'eau simulant le combustible pendant les expériences.

3.2.3 Considérations optiques

Dans le cadre de ce projet, la source d'excitation utilisée pour accomplir la FPIL est un laser à argon ionisé de classe 4, soit la plus dangereuse qui existe. L'emploi d'un tel laser requiert énormément de précaution car il peut causer des incendies, des lésions à la peau et des dommages permanents aux yeux, que ce soit par exposition directe, ou même par réflexion spéculaire et diffuse du rayon (Smalley, 2011). C'est l'une des raisons pourquoi il faut absolument que les surfaces du prototype à travers lesquelles est dirigé le laser soient à la fois planes et lisses. D'autant plus qu'il s'agit également de la seule façon d'éviter la distorsion des images captées par la caméra. Une troisième raison justifiant ce choix réside dans le fait qu'il serait difficile et coûteux de se procurer des matériaux sur mesure à la fois courbes et transparents pour la construction du prototype. Mises à part les surfaces transparentes dont la fonction consiste précisément à permettre un accès visuel à l'intérieur du prototype, il faut que les matériaux de construction utilisés soient peints en noir afin d'absorber les rayons lasers projetés dans leur direction. Seule la lumière directe provenant du laser est désirable. Toutes formes de réflexion représentent un danger pour la personne effectuant les expériences et risquent perturber les résultats obtenus en augmentant l'intensité lumineuse émise par les particules du traceur.

La véritable chambre de combustion étant de forme cylindrique, il prévalait de se débarrasser des surfaces extérieures courbes tout en conservant autant que possible la même configuration interne. Pour ce faire, une coupe transversale de la chambre de combustion passant par son centre a d'abord été effectuée à l'aide du logiciel NX, un logiciel de conception assisté par ordinateur (CAO) développé par la compagnie Siemens pour la gestion du cycle de vie de leurs produits, afin d'obtenir le profil 2D de la pièce d'intérêt. Cette opération donne une section ressemblant à celle présentée à la Figure 11. Comme les parties de gauche et de droite du profil 2D sont parfaitement symétriques, seul l'un des côtés est retenu.

L'étude portant seulement sur le prémélange secondaire, il a été nécessaire de délimiter la zone d'intérêt pour éviter d'avoir à reproduire inutilement chacun des compartiments de la chambre de combustion. Des modifications ont été apportées pour satisfaire les exigences des techniques de construction du prototype ainsi que de la méthode d'acquisition des données employée. La Figure 14 montre le profil 2D simplifié obtenu. On y voit l'emplacement des plaques perforées faisant l'objet de cette étude. Les changements effectués incluent l'inversement de l'orientation du conduit menant à l'injecteur de combustible dans le but que tous les raccords du prototype au système hydraulique se fassent du même côté. L'angle et la forme de l'injecteur de combustible sont toutefois demeurés intacts pour ne pas affecter les caractéristiques propres au mélange. Pour ce qui est du réseau de distribution d'air, seule la configuration de l'espace entre les deux plaques perforées n'a pas été modifiée. Le compartiment en amont a été allongé et aplani de sorte que l'écoulement soit le plus homogène possible avant d'atteindre la zone de mélange. Il serait aberrant d'essayer d'améliorer l'homogénéité d'un mélange dont la composition et la distribution des affluents ne sont elles-mêmes pas homogènes. La zone de mélange a été légèrement modifiée avec l'ajout d'un coin à angle de 45° afin d'abolir les surfaces courbes tout en conservant un écoulement uniforme. Un coin à angle droit avait préalablement été envisagé sans toutefois être retenu puisque le changement de direction trop abrupte perturbait le comportement du mélange. Malgré tout, le rayon de courbure, la hauteur et la longueur de la zone de mélange formée sont identiques à ceux retrouvés dans la véritable chambre de combustion à l'étude. Le périmètre extérieur du profil 2D a été choisi en fonction

des largeurs et longueurs standards des plaques de PVC disponibles. Il en va de même pour l'épaisseur des parois extérieures qui correspond à 3/4 de pouce, soit l'épaisseur maximale des panneaux en verre borosilicate vendus par le fournisseur choisi.

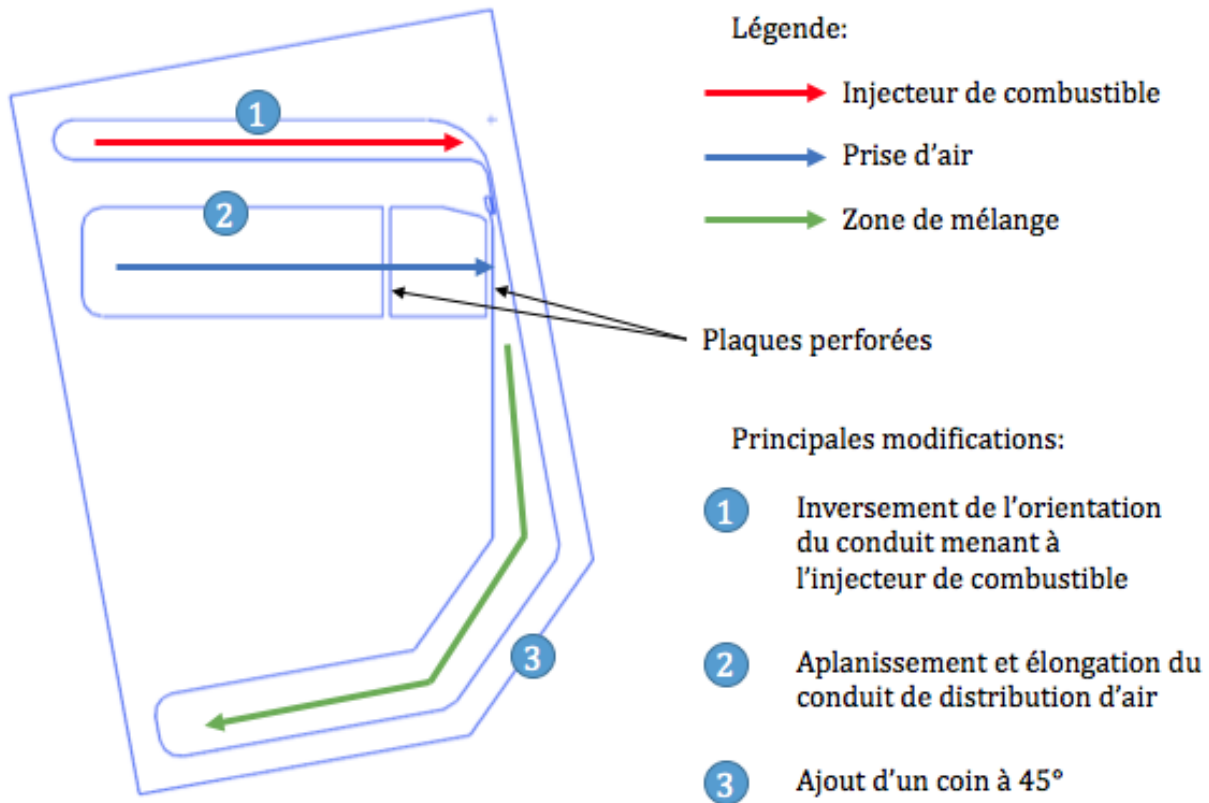


Figure 14 – Profil 2D simplifié de la pièce d'intérêt

Plutôt que d'être révolu sur 360° et ainsi reproduire la forme cylindrique initiale de la chambre de combustion, le profil 2D présenté a ensuite été extrudé de façon linéaire pour former un prisme dont les surfaces extérieures sont planes. Cette étape est représentée à la Figure 15. Il est possible d'y observer comment la révolution circulaire du profil 2D donne lieu à la formation d'une surface extérieure courbe tandis que son extrusion linéaire permet l'obtention de surfaces extérieures planes où l'insertion de fenêtres permettant un accès visuel à l'intérieur de la zone de mélange devient possible.

Somme toute, les modifications apportées à la configuration originale de la turbine et les choix de conception présentés jusqu'ici ont permis de répondre aux exigences de la FPIL sans compromettre les caractéristiques du véritable mélange.

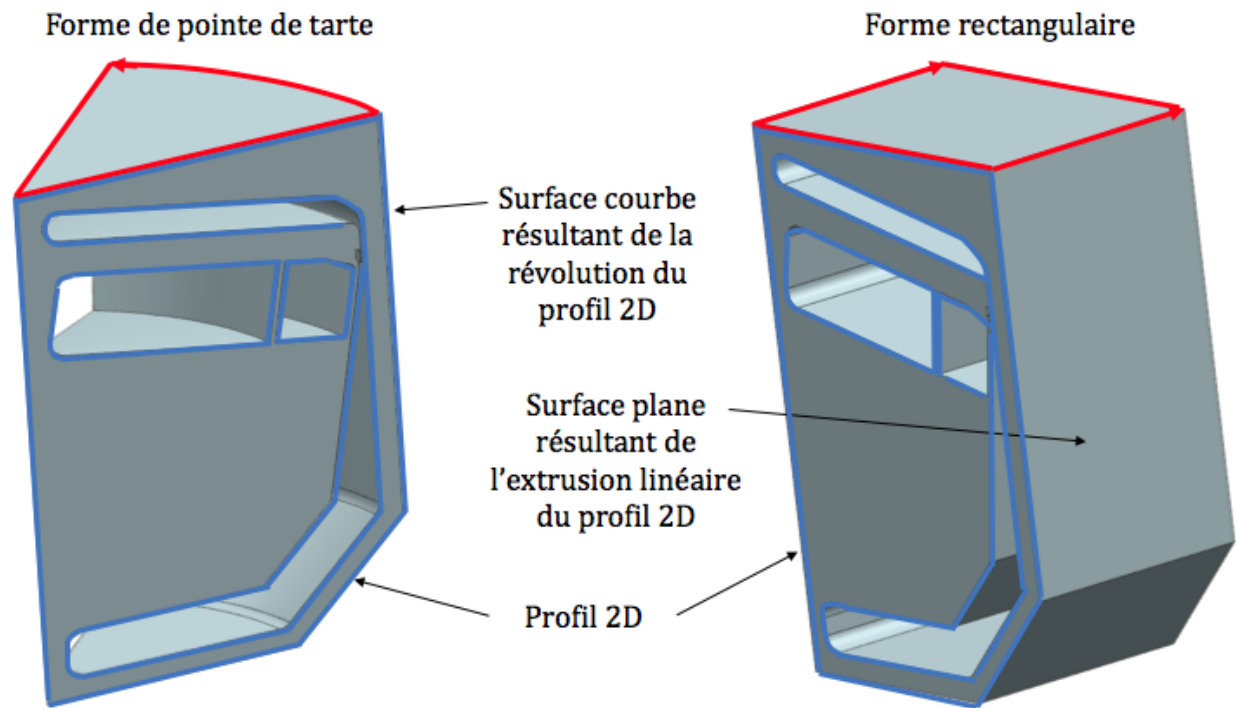


Figure 15 – Comparaison des formes obtenues par révolution et par extrusion du profil 2D

3.2.4 Dimensionnement du prototype

Le dimensionnement du prototype représente une étape complexe qui a une incidence divergente sur plusieurs phénomènes cruciaux. En premier lieu, il est souhaitable que le prototype soit le plus gros possible pour permettre un meilleur accès physique à l'intérieur de celui-ci, offrir un meilleur accès visuel de la zone d'intérêt, réduire l'effet des parois sur l'écoulement, faciliter les connections de tuyaux, diminuer la pression exercée par l'eau sur les parois et agrandir les surfaces disponibles pour poser des vis ou autres matériaux d'assemblage. En contrepartie, il faut également que le prototype soit le plus compact possible pour faciliter le maintien d'un débit élevé, assurer que la caméra utilisée durant les mesures de FPIL puisse capter l'ensemble de la zone de mélange étudiée, réduire

les coûts de construction liés à la taille des matériaux utilisés, limiter le poids du prototype et respecter les contraintes d'espace dans le laboratoire. Chacun de ces facteurs ont été pris en compte et seront discutés dans la section en cours.

Le dimensionnement du prototype est réalisé en deux temps. Tout d'abord, une fois le modèle simplifié de la Figure 14 obtenu, il faut choisir la distance de son extrusion linéaire, qui correspond en fait à la largeur du prototype. En second lieu, il faut ajuster l'échelle du prototype par rapport à la véritable chambre de combustion. Cette étape modifie la taille du prototype résultant sans affecter la proportion de ses composantes.

Puisque la chambre de combustion à l'étude est composée de 16 compartiments de prémélange secondaire qui sont en tout point identiques, il n'est pas nécessaire de reproduire chacun d'entre eux. À l'extrême, il suffirait que la largeur du prototype corresponde à un seul des 16 compartiments pour pouvoir procéder à l'optimisation du mélange qui s'y produit.

Cependant, la substitution de l'air et du combustible par de l'eau accentue l'effet des parois sur l'écoulement puisque les liquides, de par leurs propriétés physiques, sont plus visqueux que les gaz. Il faut donc que la largeur du prototype soit assez grande pour réduire les perturbations occasionnées par les parois fixes sur le fluide en mouvement. Plus spécifiquement, la zone de mélange étudiée doit se trouver à l'extérieur de la couche limite illustrée à la Figure 16. L'écoulement d'un fluide par dessus une plaque plate est l'exemple utilisé par souci de compréhension du phénomène mieux connu sous le nom de condition de non-glissement. D'un point de vue infinitésimalement petit, les particules de fluide se trouvant en contact direct avec la surface solide ne glisse pas sur celle-ci. En d'autres mots, la condition de non-glissement stipule que la vitesse tangentielle à la surface solide d'un fluide à l'interface fluide-solide est égale à la vitesse de la surface solide en ce point (Day, 2004). Par conséquent, lorsque les parois du conduit à l'intérieur duquel se produit l'écoulement sont immobiles, les particules du fluide directement en contact avec la surface adoptent une vitesse tangentielle à celle-ci étant nulle.

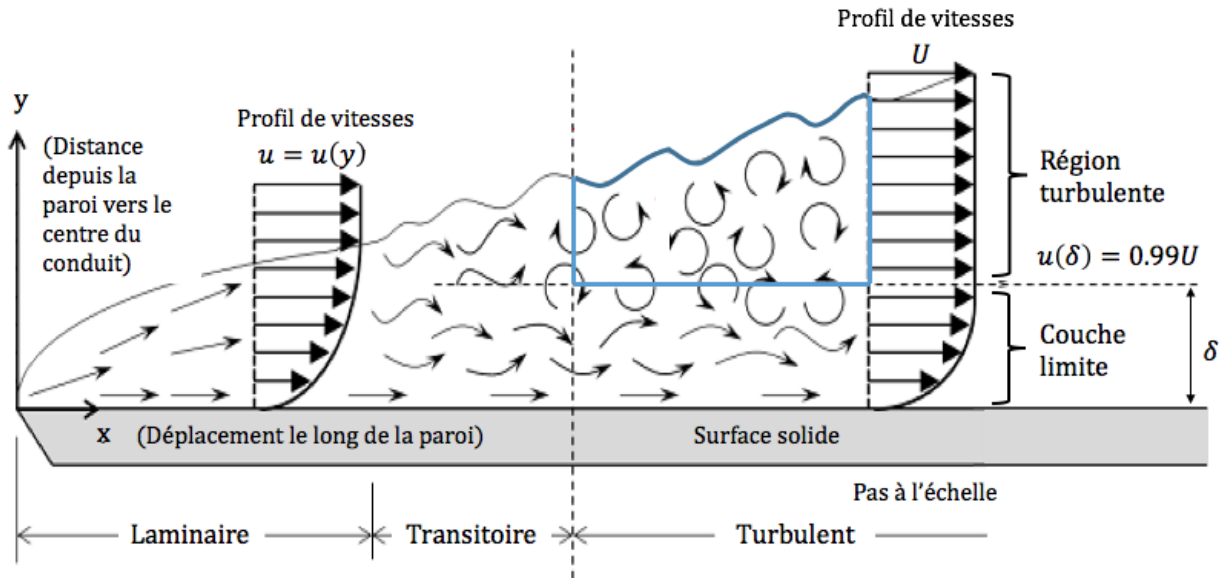


Figure 16 – Développement de la région turbulente d'un écoulement à surface libre par rapport à son profil de vitesses vertical et de sa distance avec la paroi (Schobeiri, 2010)

Les profils de vitesses apparaissant à la Figure 16 montrent bien le développement de la vitesse du fluide à partir de la paroi, valant alors zéro, jusqu'à l'obtention d'une vitesse uniforme au centre du conduit. Par définition, l'épaisseur de cette couche limite, δ , correspond à la distance normale entre la surface solide et le point où la vitesse de l'écoulement atteint 99% de la vitesse uniforme de l'écoulement sans obstacle. Ce paramètre peut être calculé grâce à l'approximation de Prandtl donnée par l'Équation 8 :

$$\delta = \frac{0.16x}{(Re_x)^{1/7}}$$

Équation 8 – Épaisseur de la couche limite (Schlichting, 1979)

Où,

δ : Épaisseur de la couche limite

Re_x : Nombre de Reynolds dans la direction de la plaque

x : Distance parcourue depuis le début de la surface solide causant la formation de la couche limite

Sachant que la zone de mélange à l'étude doit se situer à l'extérieur des couches limites occasionnées par les parois se trouvant de chaque côté, un des critères de conception à respecter pour la largeur, L , du prototype, correspondant à la distance de l'extrusion linéaire du profil 2D, devient ainsi :

$$L \geq 2\delta$$

Équation 9 – Critère de conception à respecter pour la largeur minimale prototype

Où,

L : Largeur minimal du prototype pour éviter l'effet des parois sur l'écoulement

δ : Épaisseur de la couche limite

À l'intérieur du prototype, l'épaisseur de la couche limite varie tout au long du conduit de mélange en raison de la section d'écoulement et de la distance parcourue qui changent constamment. Elle peut valoir jusqu'à près de 10 mm selon l'emplacement pris en compte. Même si ce facteur ne s'avère pas limitant, étant donné que l'extrusion linéaire doit être supérieure à 20 mm, il faut garder en tête que les images de FPIL ne doivent pas être prises trop près des parois pour éviter l'effet des parois sur l'écoulement.

La distance de l'extrusion linéaire et l'échelle du prototype ont dû être optimisées simultanément puisque les deux paramètres influencent la taille finale du prototype. Différentes combinaisons ont été testées jusqu'à l'obtention d'un résultat qui satisfaisait tous les critères mentionnés plus tôt. La Figure 17 présente les nombre de Reynolds associés à ces combinaisons. Rappelons que le nombre de Reynolds désiré pour assurer que l'écoulement produit soit en régime turbulent complètement développé s'élève à 10,000. Comme on peut le voir, en optant pour une distance d'extrusion entre 4 et 8 pouces, la réalisation de cet objectif requiert le choix d'une échelle inférieure à 3: 1, voire même 2: 1 dans certains cas.

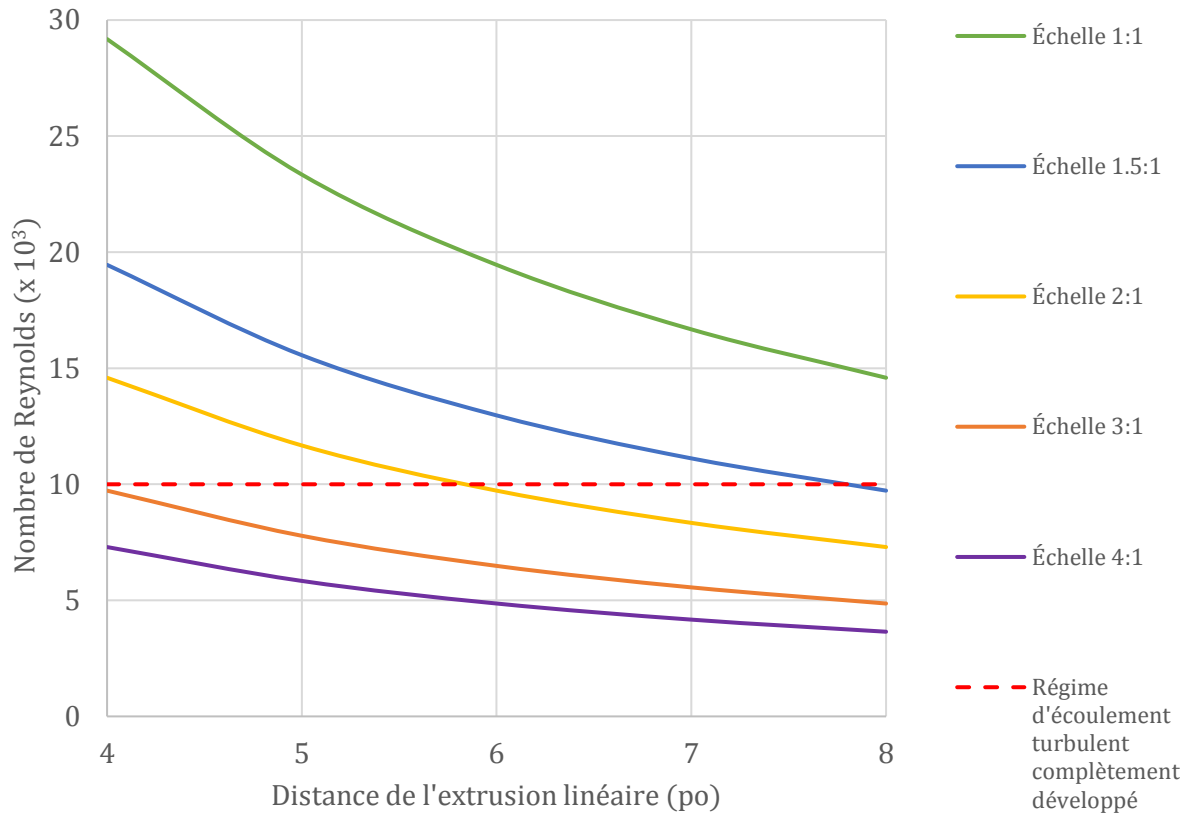


Figure 17 –Nombres de Reynolds à travers les trous de la plaque perforée étant associée à différentes combinaisons de distance d'extrusion linéaire du profile 2D et d'échelle pour le dimensionnement du prototype, et ce, pour une pompe de 1/3 hp alimentant le système avec de l'eau à 20°C

Évidemment, il a été nécessaire d'émettre certaines hypothèses pour analyser ces combinaisons puisque le système hydraulique qui alimente le prototype et qui, par le fait même, détermine les conditions d'écoulement n'était toujours pas conçu à ce stade du projet. Le débit de l'écoulement, Q , a donc été calculé à l'aide de l'Équation 10 en supposant que les pompes utilisées avaient une puissance de 1/3 hp et une efficacité de 80%. Une valeur conservatrice de 3 m a été assignée aux pertes de charge totales du système. La température de l'eau a quant à elle été estimée à 20°C, ce qui correspond approximativement à la température ambiante moyenne du local où les expériences se déroulaient.

$$Q = \frac{P}{\eta \rho g h}$$

Équation 10 – Débit fourni par une pompe

Où,

Q : Débit de l'écoulement (m^3/s) $\approx 6.8 L/s$

P : Puissance fournie à l'eau par la pompe (W) $= \frac{1}{3} hp \cdot 745.7 \frac{W}{hp} = 248.6 W$

η : Efficacité de la pompe (%) $\approx 80\%$

ρ : Masse volumique de l'eau (kg/m^3) $\approx 998.2 kg/m^3$

g : Accélération gravitationnelle (m/s^2) $= 9.81 m/s^2$

h : Perte de charge (m) $\approx 3 m$

En vue de calculer le nombre de Reynolds associé, il prévalait de convertir le débit fourni par la pompe en vitesse d'écoulement grâce à l'Équation 11 :

$$U_0 = \frac{Q}{A_H}$$

Équation 11 – Relation entre la vitesse et le débit d'un écoulement

Où,

U_0 : Vitesse moyenne de l'écoulement au point considéré

Q : Débit moyen de l'écoulement au point considéré

A_H : Aire hydraulique de la section d'écoulement

Dans le cas échéant, la section d'écoulement correspond aux trous de la plaque perforée. Le patron des trous ayant été utilisé pour la plaque est le même que celui retrouvé dans la véritable chambre de combustion, dont la figure a été retirée pour des raisons de confidentialités. En somme, tous les trous possèdent le même diamètre. Les trous au sein de chaque rangée sont équidistants. Quant à elles, les rangées sont décalées pour que la disposition des trous puisse être en alternance, c'est-à-dire que les trous sont alignés

diagonalement. L'aire hydraulique associée à l'Équation 11 correspond à la superficie totale de l'ensemble des trous. Celle-ci varie en fonction de la distance d'extrusion et de l'échelle du prototype. En effet, l'augmentation de la distance d'extrusion du profil 2D, et donc de la largeur du prototype, a pour effet d'augmenter le nombre de trous tandis que l'augmentation de l'échelle du prototype a pour effet d'augmenter la taille de chaque trou. La relation entre le débit et la vitesse d'écoulement présentée à l'Équation 11 explique d'ailleurs pourquoi le nombre de Reynolds, directement proportionnel à la vitesse d'écoulement, diminue avec l'agrandissement de la section d'écoulement qui résulte de l'élargissement du prototype. La Figure 17 montre bien que pour un débit donné, plus l'aire hydraulique de la section d'écoulement est grande, moins la vitesse d'écoulement est élevée et plus le nombre de Reynolds est faible. Une fois le débit fourni par la pompe converti en vitesse d'écoulement, le nombre de Reynolds est calculé grâce à l'Équation 3 en assumant que la température de l'eau correspond à 20°C, de sorte que la masse volumique et la viscosité dynamique de cette dernière valent respectivement 998.2 kg/m^3 et $1.002 \times 10^{-3} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$.

Des simulations numériques par logiciel informatique ont été effectuées parallèlement aux calculs de conception théoriques dans le but de renforcer certaines décisions exécutives et d'identifier des problèmes qui auraient autrement été imprévisibles. Pour ce faire, la mécanique des fluides numérique, généralement désignée par le terme anglais *computational fluid dynamics* (CFD), a été employée. Cette méthode consiste à étudier les mouvements d'un fluide par résolution numérique des équations qui le régissent. La fiabilité des résultats produits dépend de la validité des approximations choisies lors de la représentation du problème. Sans laisser les analyses de mécanique des fluides numérique dictées le processus de conception, elles s'avèrent un excellent outil complémentaire à celui-ci. Parmi les simulations numériques disponibles, les lignes de courant donnent une bonne indication des perturbations susceptibles d'avoir lieu dans l'écoulement. Il est beaucoup plus facile de remédier au problème pendant le processus de conception, en apportant les modifications nécessaires directement à la pièce modélisée en 3D, que d'essayer de corriger la situation après avoir achevé la construction du prototype. Par exemple, d'après la Figure 18, il paraissait évident que le choix d'un prototype possédant une plus grande largeur (image de droite) était préférable à une plus petite largeur (image de gauche) compte tenu

du comportement indésirable du fluide observé dans le conduit de mélange. Cette portion de l'analyse est seulement qualitative.

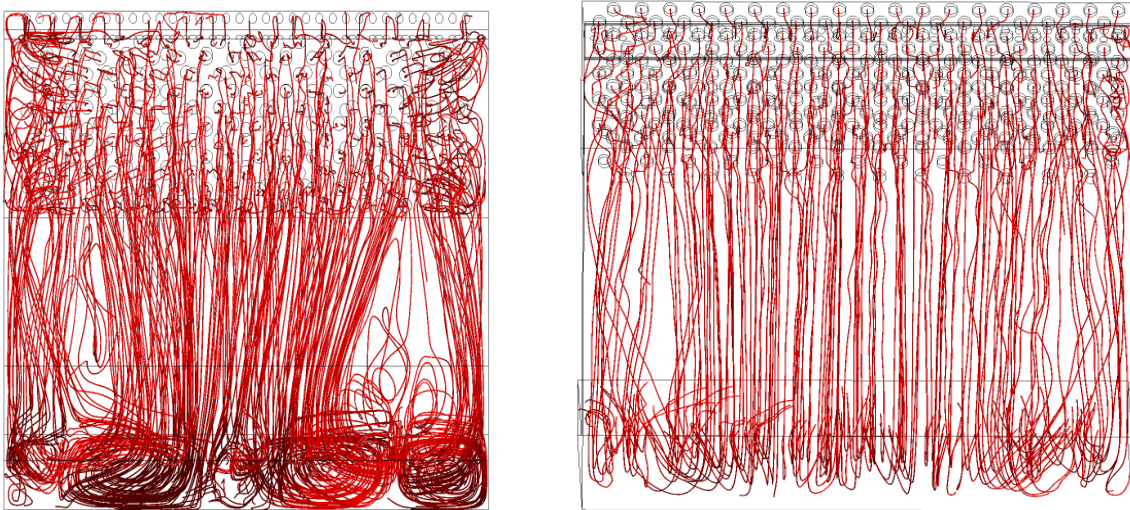


Figure 18 – Lignes de courant de l'écoulement dans la zone de mélange telles que produites par analyses de mécanique des fluides numérique pour des prototypes à échelle 1:1 possédant des largeurs de montage différentes

De la même façon, il était possible d'effectuer des analyses quantitatives en produisant des simulations numériques de la fraction massique du fluide dans la zone de mélange, comme à la Figure 19. Tel qu'illustré par la partie colorée en rouge sur la photo, la fraction massique du fluide est uniforme et maximale avant qu'il ne traverse la plaque perforée et se mélange avec le deuxième fluide composant le mélange. Une fois dans la zone de mélange, la concentration du fluide diminue par rapport à sa concentration initiale. Ainsi, sa fraction massique diminue au fur et à mesure qu'il se dilue en raison du mélange.

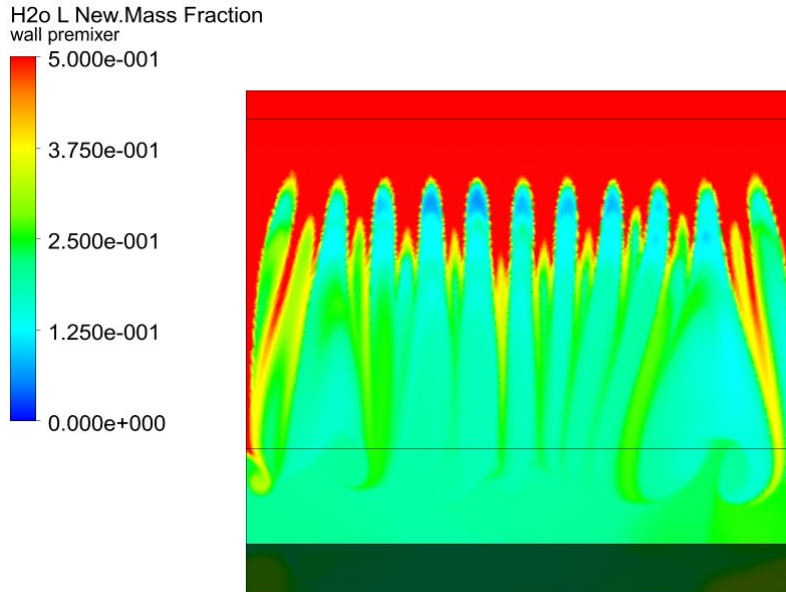


Figure 19 –Fractions massiques du fluide dans la zone de mélange, telle qu’obtenue par analyses de mécanique des fluides numérique

L’analyse quantitative est complétée en calculant numériquement le coefficient de non-uniformité du mélange en tout point grâce à l’Équation 2 et en traçant la courbe des pourcentages cumulatifs correspondante. Celle associée à l’exemple précédant apparaît à la Figure 20. La courbe noire en forme d’escalier représente la situation utopique où le mélange serait complètement homogène partout dans la zone étudiée. La courbe bleue illustre le résultat obtenu pour le prototype utilisé comme exemple. L’intervalle situé entre les points jaune et orange indique qu’à peine 40% ($0.8 - 0.4$) de la zone de mélange ne s’écarte pas à plus de 10% de la valeur correspondant à un mélange parfaitement homogène. Il y a donc des fluctuations spatiales assez importantes de la concentration du fluide. De son côté, le point vert peut être interprété comme si 67% de la zone de mélange comportait une fraction massique du fluide passant à travers la plaque qui est inférieure à la fraction massique nécessaire pour obtenir un mélange homogène, et inversement pour le tiers (33%) restant. Bref, il s’est avéré utile de comparer différents prototypes en utilisant cette technique afin de retenir celui dont la courbe des pourcentages cumulatifs se rapprochait le plus possible de celle colorée en noire et possédant une forme d’escalier.

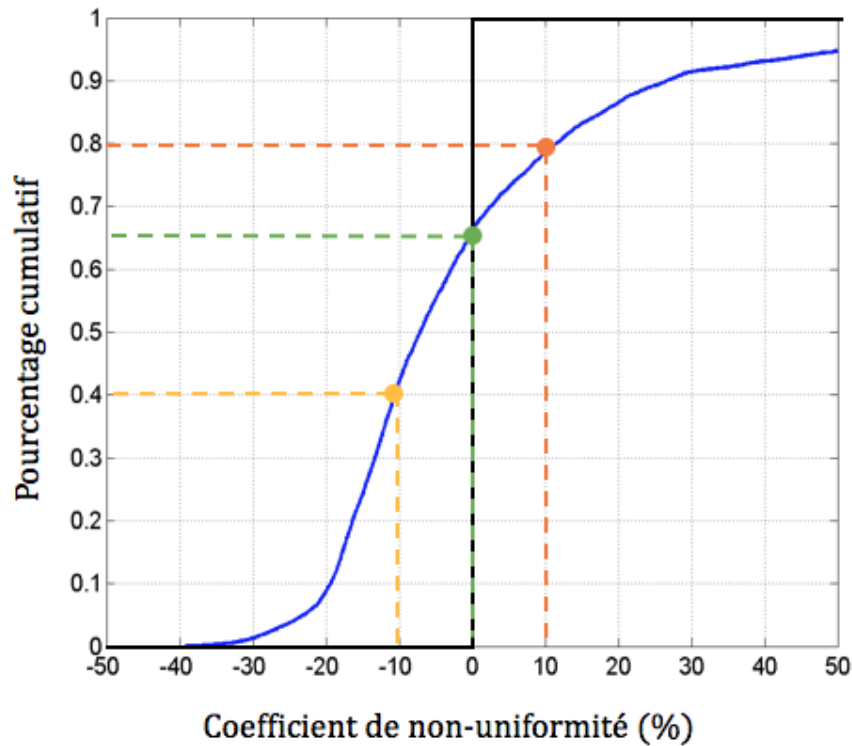


Figure 20 – Courbe des pourcentage cumulatifs du coefficient de non-uniformité dans la zone de mélange du prototype choisi comme exemple pour le fluide traversant la plaque perforée

Après un long processus d'optimisation, une distance d'extrusion du profil 2D de 8 pouces, correspondant à la largeur du prototype, a été choisie. En termes de compartiments de prémélange secondaire, cette largeur équivaut à un nombre intégral de 3 d'entre eux sur les 16 que comporte la véritable chambre de combustion. De plus, la largeur intérieure du prototype a permis la création de patrons de trous sur les plaques perforées qui étaient parfaitement symétriques par rapport à leur centre.

3.2.5 Considérations pratiques

Étant donné que le but de ce projet consiste à étudier l'effet de différentes plaques perforées sur le mélange, il fallait non seulement qu'un accès physique à l'intérieur du prototype soit possible, mais également qu'un système simple permettant de changer les

pièces amovibles facilement existe. En vue de combler au besoin de pièces amovibles, deux fentes aux formes particulières ont été créées à même les parois du prototype, telles qu'illustrées à la Figure 21.

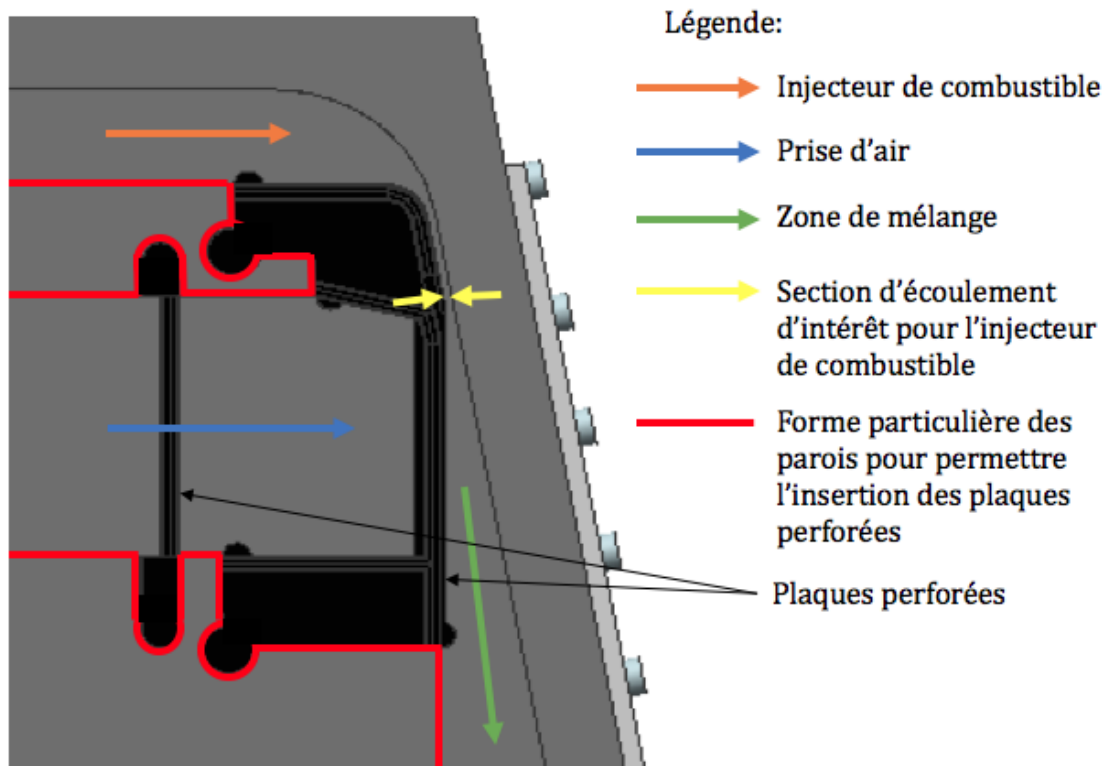


Figure 21 – Vue aérienne du système d'insertion des pièces amovibles à l'intérieur du prototype

Pour la plaque perforée de gauche, en amont, l'ajout d'une tête et d'un pied encastrés dans la paroi vient priver la plaque d'une liberté de mouvements vertical ou horizontal. Le même résultat se produit pour la plaque perforée de droite, en aval, bien que la fente soit de forme cylindrique plutôt qu'allongée. Il suffisait que l'ouverture de sa section circulaire (12 mm) soit inférieure au diamètre du cercle en question (20 mm) pour empêcher la plaque de pouvoir sortir de la fente. Seule l'insertion des plaques par le côté du prototype, d'où la vue aérienne est prise à la Figure 21, est possible. Une fois glissées à l'intérieur de leur fente respective, les plaques ne peuvent plus bouger. La fente de gauche est volontairement laissée plus large que nécessaire dans l'éventualité où il serait intéressant de tester des plaques plus épaisses que celle actuelle.

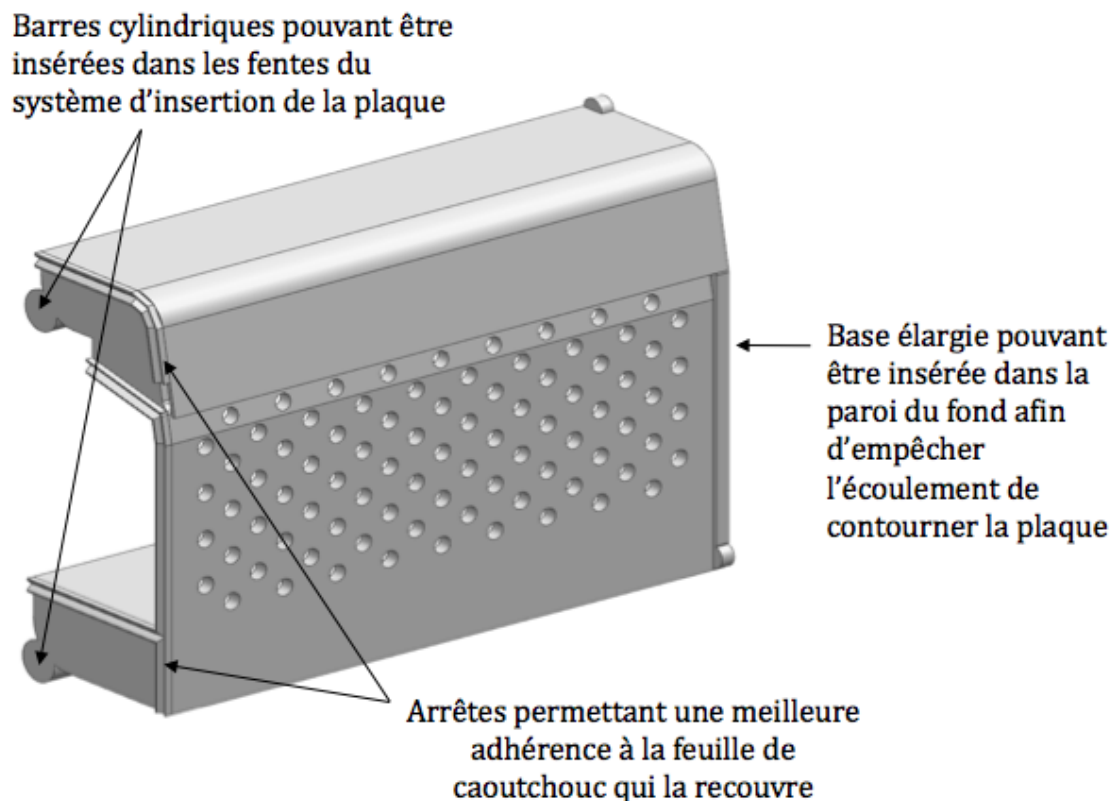


Figure 22 – Composantes ajoutées aux plaques perforées pour permettre leur insertion dans les fentes du prototype ainsi que pour empêcher l'écoulement de les contourner une fois qu'elles sont mises en place

Pour forcer l'écoulement à traverser les plaques sans aucun moyen de les contourner, une base plus étroite s'enfonçant dans la paroi du fond, lorsque le prototype est observé du dessus comme à la Figure 21, a été ajoutée à chaque plaque perforée. Des arrêtes assurant une meilleure adhérence à la feuille de caoutchouc, qui viendra ultimement recouvrir les plaques, sont aussi ajoutées de l'autre côté de celles-ci. Ces composantes sont visibles à la Figure 22.

En second lieu, l'installation de fenêtres sur trois des faces du prototype a été jugée nécessaire pour permettre l'accès visuel à toute la zone d'intérêt. Les faces en question sont identifiées sur la Figure 23. Le matériau utilisé pour les fenêtres est du verre borosilicate. Il s'agit d'un matériau fragile aux impacts, bien entendu, mais relativement résistant à la

pression et aux égratignures, contrairement à d'autres types de matériaux moins dispendieux ayant été considérés, comme le plexiglas. Des panneaux de 3/4 po, l'épaisseur maximale disponible chez le fournisseur (McMaster-Carr), ont été choisis.

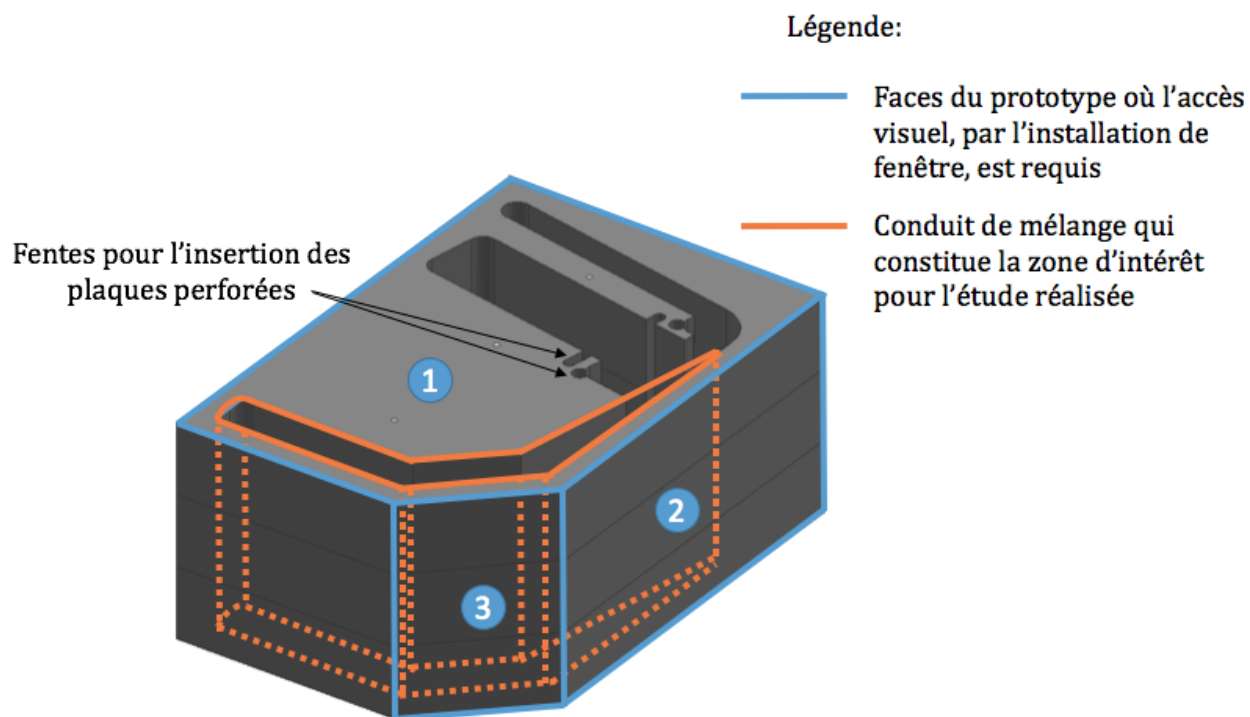


Figure 23 – Délimitations de la zone d'intérêt pour l'étude du mélange ainsi que des trois faces du prototype où l'installation de fenêtres pour l'accès visuel est requise

Avec l'installation des fenêtres se dressait plusieurs défis majeurs. Premièrement, il fallait qu'elles puissent résister à la pression générée par l'écoulement. Deuxièmement, elles devaient être parfaitement étanches pour éviter les fuites d'eau lors des expériences, d'autant plus que les débits requis pour atteindre le nombre de Reynolds souhaité sont élevés. Troisièmement, il ne fallait pas que l'écoulement dans le conduit de mélange soit perturbé par la présence de ces fenêtres. La solution à tous ces problèmes résidait dans la création de cadrages d'acier inoxydable avec une section en forme de T comme ceux montrés à la Figure 24.

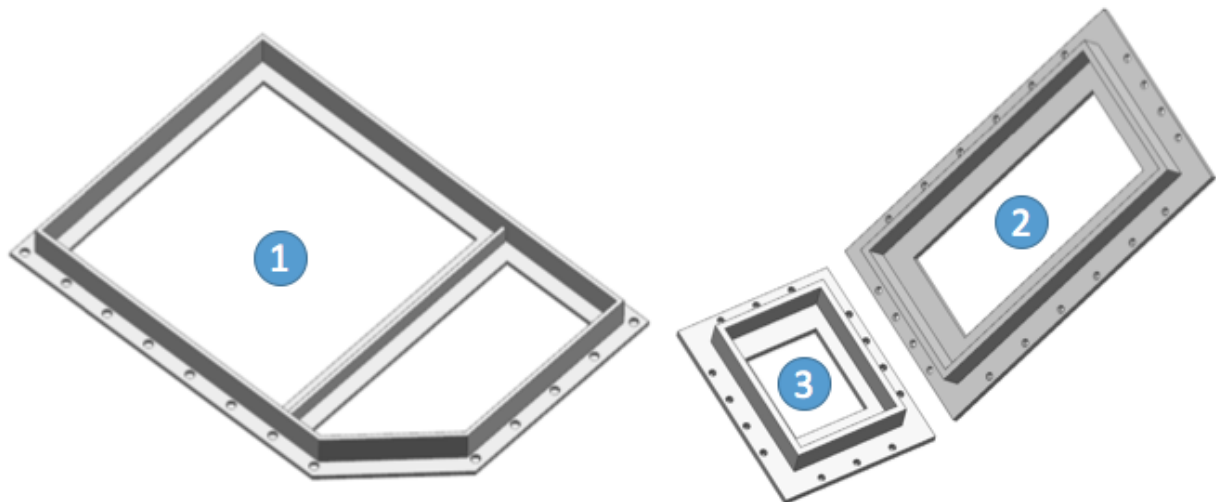


Figure 24 – Cadrages utilisés pour l'installation des fenêtres

La première fenêtre possède une double fonction. En plus de permettre un accès visuel comme c'est le cas pour les deux autres fenêtres, elle agit littéralement comme un couvercle et procure ainsi un accès physique à l'intérieur du prototype pour le changement des pièces amovibles ou l'entretien des parois. Il était donc essentiel que cette fenêtre recouvre la totalité de la surface sur laquelle elle s'appuie. Cependant, les panneaux de verre borosilicate n'étaient pas disponible en format aussi grand que désiré chez le fournisseur, d'où la raison pour laquelle la fenêtre est décomposée en deux panneaux distincts, joints au moyen d'une barre transversale. Bien que la forme des cadrages diffère selon les contraintes dimensionnelles propres à chaque fenêtre, la section transversale en forme de T est identique pour tous les cadrages. Cette dernière permet l'installation permanente de la fenêtre au centre du cadre grâce à l'application de silicone sur les surfaces en contact avec celle-ci. Elle permet également l'installation des fenêtres sur le prototype avec une extension servant à poser des vis qui compressent le cadre contre une feuille de caoutchouc préalablement mise en place par souci d'étanchéité. Finalement, la barre verticale du T sépare et protège le verre borosilicate du plastique dans lequel les cadrages sont encastrés. Il importe que sa longueur corresponde exactement à l'épaisseur des panneaux de verre borosilicate et celle des parois de plastique, soit 19.05 mm (3/4 pouce). Ainsi, leur surface intérieure coïncide et le conduit de mélange demeure lisse. De cette manière, l'écoulement

n'est pas perturbé par la formation de transitions abruptes ou d'obstacles. La Figure 25 montre ladite section transversale en forme de T des cadrages et ses particularités.

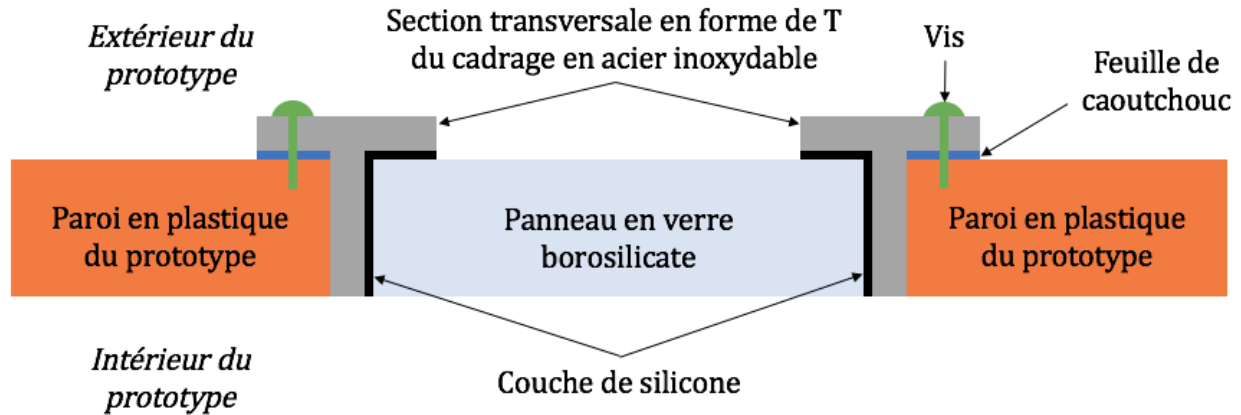


Figure 25 – Illustration de la section transversale en forme de T des cadrages en acier inoxydable et des différents joints d'étanchéité

3.2.6 Système hydraulique

La première étape de la conception du système hydraulique consistait à choisir les pompes alimentant le prototype. Les compartiments du prototype représentant l'injecteur de combustible et la prise d'air devaient chacun être branchés à une pompe différente, par l'intermédiaire de circuits indépendants. Il ne fallait évidemment pas que les fluides utilisés se mélangent avant l'atteinte du conduit de mélange. En cas de besoin de visualisation de ces zones, le lecteur est prié de se référer à nouveau à la Figure 14. À titre de rappel, il a été déterminé que le nombre de Reynolds minimal requis pour assurer un régime d'écoulement complètement développé au sein du prototype s'élève à 10,000. Il s'agit du critère de conception principal ayant été utilisé pour faire le choix des pompes. Avant de sélectionner le modèle de pompe à se procurer, il était primordial de trouver la puissance des pompes requises. Pour ce faire, le débit fourni par les pompes en fonction de leur puissance a été calculé grâce à l'Équation 10, et ce, pour les conduits simulant l'entrée d'air et l'injection de combustible. À ce sujet, il faut savoir que des valeurs standards existent pour la puissance des pompes, à savoir : $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, 1, 2 et 3 hp. Seules ces valeurs ont été employées pour la suite

des calculs. Puis, de la même façon que pour le dimensionnement du prototype à la section 3.2.4, il fallait convertir les débits obtenus en vitesses d'écoulement à l'aide de l'Équation 11. La section d'écoulement d'intérêt pour le conduit simulant la prise d'air correspond encore une fois à la superficie totale des trous de la plaque perforée qui débouche sur la zone de mélange. Pour ce qui est de la section d'écoulement d'intérêt pour le compartiment simulant l'injecteur de combustible, il s'agit de l'espace étroit en amont de la zone de mélange, tel qu'illustré à la Figure 21. Les nombres de Reynolds associés sont finalement calculés grâce à l'Équation 3. Les Tableaux 1 et 2 présentent les résultats obtenus pour les débits, les vitesses d'écoulement et les nombre de Reynolds en fonction de la puissance des pompes standards, et ce, pour les compartiments simulant la prise d'air et l'injecteur de combustible, respectivement. Les résultats indiquent que même une pompe de 1/3 hp est suffisamment puissante pour surpasser le nombre de Reynolds minimal désiré. Du moment que le nombre de Reynolds minimal est atteint, il est préférable d'opter pour la pompe qui est la moins puissante parmi celles disponibles car il s'agit aussi généralement de la moins dispendieuse. À ce stade, le choix d'une pompe de 1/3 de hp est donc retenu pour les deux compartiments car il permet dans tous les cas l'obtention d'un écoulement turbulent pleinement développé.

Tableau 1 - Débit, vitesse d'écoulement et nombre de Reynolds associés à différentes puissances de pompes standards alimentant le compartiment simulant la prise d'air

Puissance de la pompe (hp)	Débit (L/s)	Vitesse d'écoulement (m/s)	Re ($\cdot 10^3$)
1/3	6.8	2.9	15
1/2	10.2	4.3	22
3/4	15.2	6.5	33
1	20.3	8.6	44
2	40.6	17.3	88
3	60.9	25.9	131

Tableau 2 - Débit, vitesse d'écoulement et nombre de Reynolds associés à différentes puissances de pompes standards alimentant le compartiment simulant l'injecteur de combustible

Puissance de la pompe (hp)	Débit (L/s)	Vitesse d'écoulement (m/s)	Re ($\cdot 10^3$)
1/3	6.8	17	33
1/2	10.2	25	50
3/4	15.2	38	75
1	20.3	50	100
2	40.6	100	199
3	60.9	150	299

Tel que mentionné lors de la discussion du choix des réactants à la section 3.2.2, le respect du ratio des vitesses d'écoulement entre l'air et le combustible dans la vraie chambre de combustion, valant 4:3, représente le deuxième critère de conception. Ce ratio est exprimé par l'Équation 12.

$$\frac{(V_a)_{réel}}{(V_c)_{réel}} = \frac{(V_a)_{exp}}{(V_c)_{exp}}$$

Équation 12 – Ratio des vitesses réelles entre l'air et le combustible à respecter dans le prototype expérimental

Où,

V_a : Vitesse d'écoulement de l'air (ou du fluide simulant l'air)

V_c : Vitesse d'écoulement du combustible (ou du fluide simulant le combustible)

Sans nécessairement influencer le choix des pompes en soi, le ratio des vitesses dicte le débit auquel elles devront être opérées lors des expériences. Lorsque le nombre de Reynolds pour le compartiment simulant la prise d'air est fixé à 10,000, le débit et la vitesse d'écoulement associés valent respectivement 3.55 L/s (55.5 US gal/min) et 1.51 m/s. En vue de respecter le ratio des vitesses, il faut alors que celle du fluide simulant le combustible soit

précisément de 1.13 m/s. Par conséquent, le débit opérationnel requis pour la pompe alimentant le simili injecteur de combustible correspond à 0.46 L/s (7.3 US gal/min).

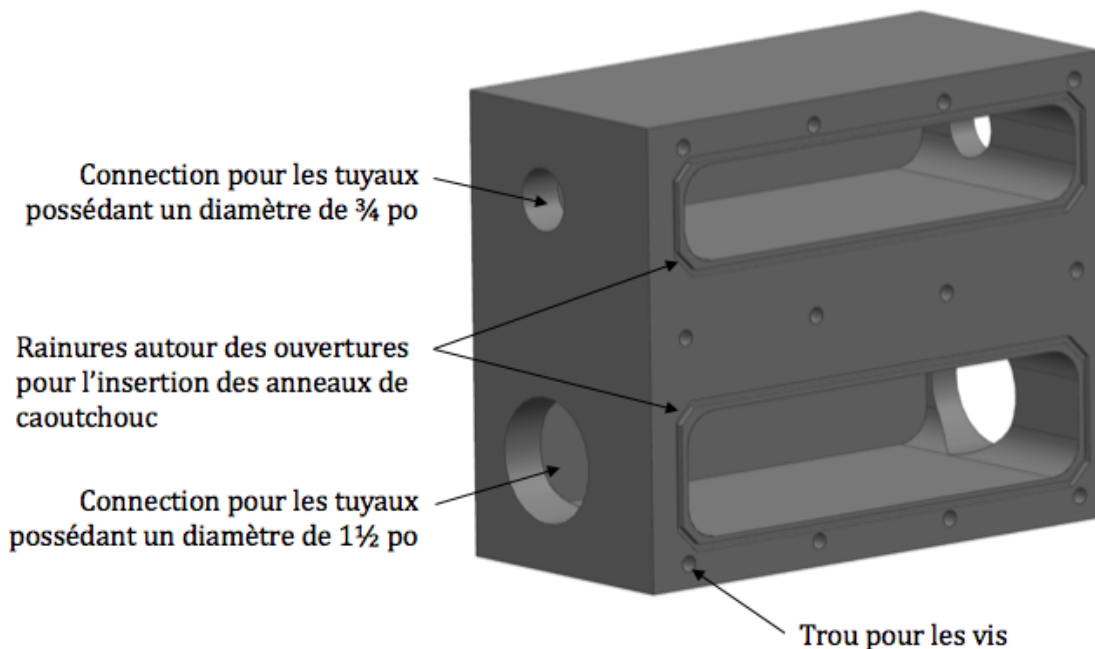


Figure 26 – Boîte collectrice munie de connexions pour les tuyaux et d'ouvertures menant aux différents compartiments du prototype

Avant de dimensionner les tuyaux, il fallait décider comment les brancher au prototype. Non seulement l'eau doit être alimentée avec le débit de conception, mais elle doit également être acheminée de façon uniforme, c'est-à-dire à la manière d'un écoulement piston. Pour y arriver, plusieurs options ont été considérées dont l'installation d'une buse facilitant l'élargissement rapide du jet sur la courte distance à parcourir avant l'atteinte de la zone de mélange, la création de déflecteurs ayant le même effet, ou même la présence de multiple points d'injection, mais de nombreux problèmes s'imposaient en pratique. La solution ayant été retenue consiste en une boîte munie de connexions latérales pour l'embranchement des tuyaux. En procédant ainsi plutôt qu'en raccordant les tuyaux directement à l'arrière du prototype, la formation de chemins préférentiels est évitée et l'écoulement demeure uniforme. La Figure 26 montre la boîte en question qui comporte deux cavités indépendantes divisées par une séparation au centre. Elles débouchent chacune sur

l'ouverture du compartiment qu'elles alimentent, tel qu'observé à la Figure 27. Des rainures sont creusées autour des ouvertures afin d'y insérer un anneau de caoutchouc qui assure l'étanchéité. Des vis sont finalement posées pour compléter l'installation de la boîte sur le prototype. De la même façon, une deuxième boîte est conçue pour la sortie du mélange. Outre le fait qu'elle comporte une seule cavité au lieu de deux, cette dernière est quasi-identique à la première.

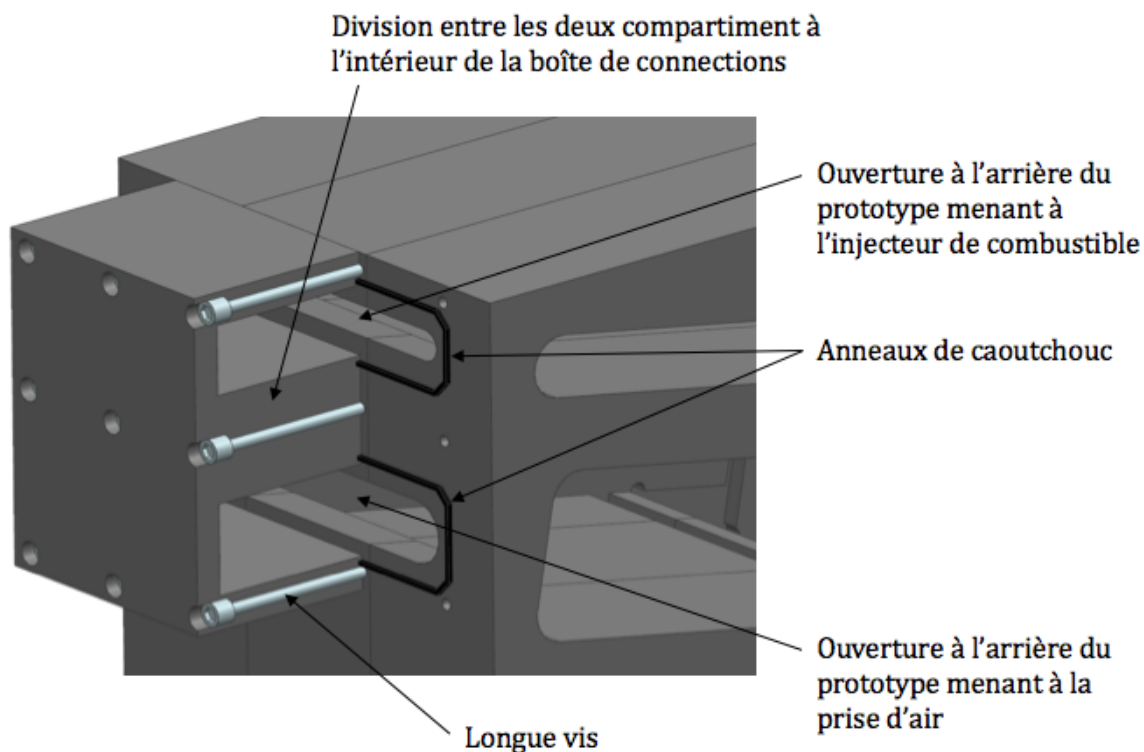


Figure 27 – Installation de la boîte collectrice à l'arrière du prototype avec des anneaux de caoutchouc pour assurer l'étanchéité des joints

Lors du dimensionnement des tuyaux, il était préférable de maximiser leur grosseur pour réduire les pertes de charge linéaires engendrées dans le système hydraulique. En effet, ces dernières sont proportionnelles au carré de la vitesse d'écoulement, tel que stipulé par l'équation de Darcy-Weisbach présentée à l'Équation 13. Ainsi, l'augmentation de la section hydraulique, par le choix d'un plus gros tuyau, tout en maintenant le débit constant, a pour effet de réduire la vitesse d'écoulement et, par le fait même, les pertes de charge linéaires. La grosseur des tuyaux était cependant limitée par la taille relativement petite de la boîte

collectrice. À cause des contraintes physiques, il s'avérait pratiquement impossible d'opter pour des conduites dont le diamètre nominal surpassait $\frac{3}{4}$ po et $1\frac{1}{2}$ po, respectivement, pour les cavités du dessus et de dessous. Il s'agit donc du choix qui a été fait. Des coudes à 90° sont utilisés comme raccords pour brancher les tuyaux à la boîte de sorte que les tuyaux peuvent être dirigés directement vers le prototype sans être tordus inutilement.

$$\Delta h = f \frac{L}{D_h} \frac{v^2}{2g}$$

Équation 13 – Pertes de charge linéaires dans une conduite circulaire (Darcy, 1857)

Où,

Δh : Pertes de charge linéaires (m)

f : Coefficient de friction

L : Longueur du tuyau (m)

v : Vitesse de l'écoulement (m/s)

D_h : Diamètre hydraulique (m)

g : Accélération gravitationnelle = 9.81 m/s^2

Le choix d'une pompe s'effectue à l'aide de sa courbe de performance, qui est émise par le manufacturier. Il s'agit d'un graphique où la hauteur manométrique, c'est-à-dire la pression que fournit la pompe, est tracée en fonction du débit. L'augmentation du débit accentue les pertes par frottement dans la pompe qui à leur tour font décroître la hauteur manométrique résultante. L'inverse se produit pour la courbe du réseau qui est caractéristique du circuit hydraulique et représente l'énergie à fournir au fluide pour le faire circuler au débit souhaité. Dans ce cas, la charge hydraulique augmente exponentiellement avec le débit. Ainsi, il existe un point d'intersection entre les deux courbes, à l'endroit où le débit est nominal, qui correspond au point de fonctionnement. Ceci dit, il faut savoir qu'une pompe centrifuge fonctionne grâce à une roue qui tourne pour accélérer le fluide qui la traverse. En maintenant la vitesse de rotation du moteur constante, la réduction du diamètre de la roue permet d'augmenter la vitesse tangentielle qu'elle transmet au fluide et, par le fait même, le débit de l'écoulement résultant. À partir d'une seule pompe, une famille complète

capable de produire une large gamme de performances peut donc être créée avec le simple rognage de la roue. À la Figure 28, il est possible d'observer les courbes de pompe qui correspondent à différentes grosseurs de roue pour le modèle de pompe *Magna 3 40-80 F* développé par la compagnie Grundfos. La courbe du réseau a été tracée pour le circuit hydraulique alimentant le conduit qui simule l'injecteur de combustible à 3.55 L/s. La pompe retenue doit englober le point de fonctionnement, faute de quoi il y aura des problèmes de cavitation lors de son opération. Dans le cadre de ce projet, le fournisseur Dynapompe s'est assuré que le choix des deux pompes Magna 3 40-80F soit adéquat pour les besoins du projet en plus de les installer sur une base d'acier, de les ajuster et de les tester en usine.

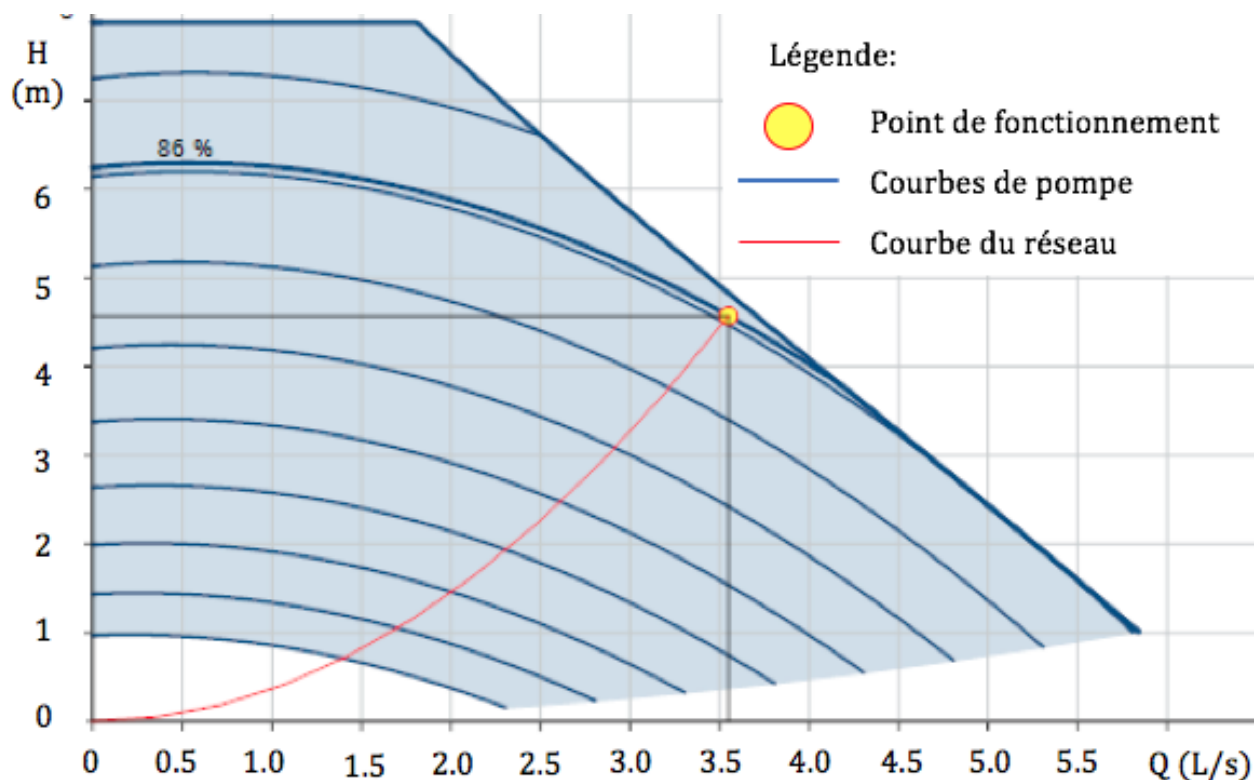


Figure 28 – Point de fonctionnement à l'intersection de la courbe du réseau calculée pour le circuit alimenté à 3.55 L/s et des courbes de performance de la famille de pompe du modèle *Magna 3 40-80 F* développé par la compagnie Grundfos

Somme toute, le système hydraulique ayant été conçu est représenté à la Figure 29. Les circuits 1 et 2 correspondent respectivement à ceux qui alimentent le conduit simulant

l'injecteur de combustible et la prise d'air. Le circuit 3 est simplement la décharge du mélange vers le drain. Des valves sont ajoutés pour pouvoir contrôler le mode opératoire du système hydraulique. Par exemple, en ouvrant la valve 1 et fermant la valve 2, l'eau est redirigée vers le réservoir en circuit fermé. C'est de cette façon que l'on peut obtenir un mélange d'eau et de traceur complètement homogène avant de réaliser les expériences avec la FPIL. Les débitmètres servent à mesurer le débit de l'écoulement tout juste avant son entrée dans le prototype pour s'assurer que les pompes soient bien réglées.

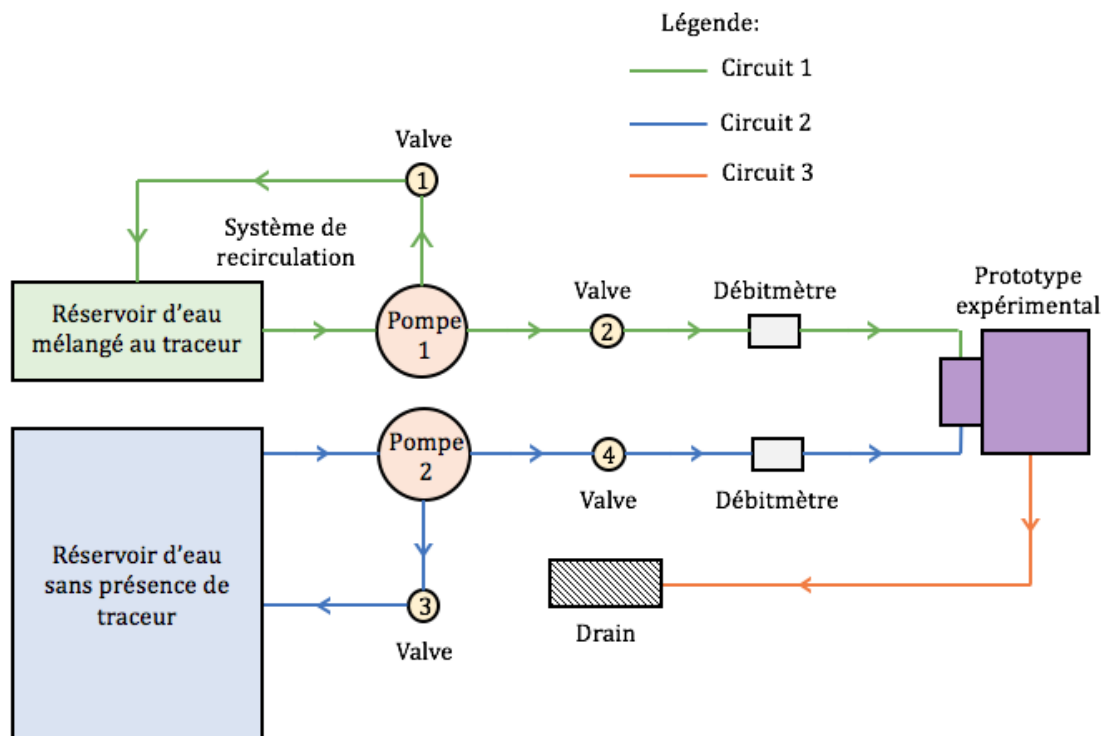


Figure 29 – Représentation du système hydraulique conçu pour alimenter le prototype expérimental

Le Tableau 3 rappelle quelques caractéristiques du système hydraulique qui ont été calculées durant les différentes étapes de son processus de conception. Les réservoirs ont été choisis en fonction de leur volume en sachant que le temps nécessaire aux expériences était d'au moins trois minutes, pendant lesquelles aucun remplissage n'est possible. Le réservoir d'eau sans traceur est le facteur limitant pour la durée des expériences, mais son volume est amplement suffisant pour conduire les essais requis.

Tableau 3 – Caractéristiques du système hydraulique conçu pour alimenter le prototype expérimental

Paramètre	Circuit 1	Circuit 2	Circuit 3
Débit de l'écoulement (L/s)	0.46	3.55	4.01
Diamètre nominal des conduites (po)	3/4	1½	1½
Volume du réservoir (L)	240	2000	-
Temps requis pour la vidange du réservoir (min)	9 :31	8 :42	-

3.2.7 Version finale du prototype

La Figure 30 montre la version finale du prototype sous plusieurs angles. Au total, 19 barres en acier soutiennent les cadrages sans obstruer l'accès visuel à la zone d'intérêt. La surface apparaissant en noire correspond à une feuille de caoutchouc découpée selon la forme exacte du profil 2D et assurant l'étanchéité de la fenêtre qui s'y dépose. La vue de face du prototype montre que toutes les rangées de trous de la plaque perforée à optimiser sont bien visibles. Au besoin, le prototype peut être couché ou tourné selon la position du laser et de la caméra lors des expériences de FPIL.

La présente section faisait l'étalage des étapes ayant menées à la version finale du prototype expérimental et du système hydraulique qui l'alimente. Le processus de décisions sur lequel reposent les choix effectués a été expliqué. Chacune des décisions est justifié selon une combinaison de calculs théoriques, de simulations numériques et/ou de raisons pratiques. La conception du prototype final a nécessité beaucoup de créativité et d'ingéniosité pour répondre aux nombreuses contraintes du projet, autant pratiques que budgétaires. Toute l'équipe ayant participé à la réalisation de ce processus a définitivement la conviction d'être parvenue à trouver la solution optimale et est fière du travail accompli.

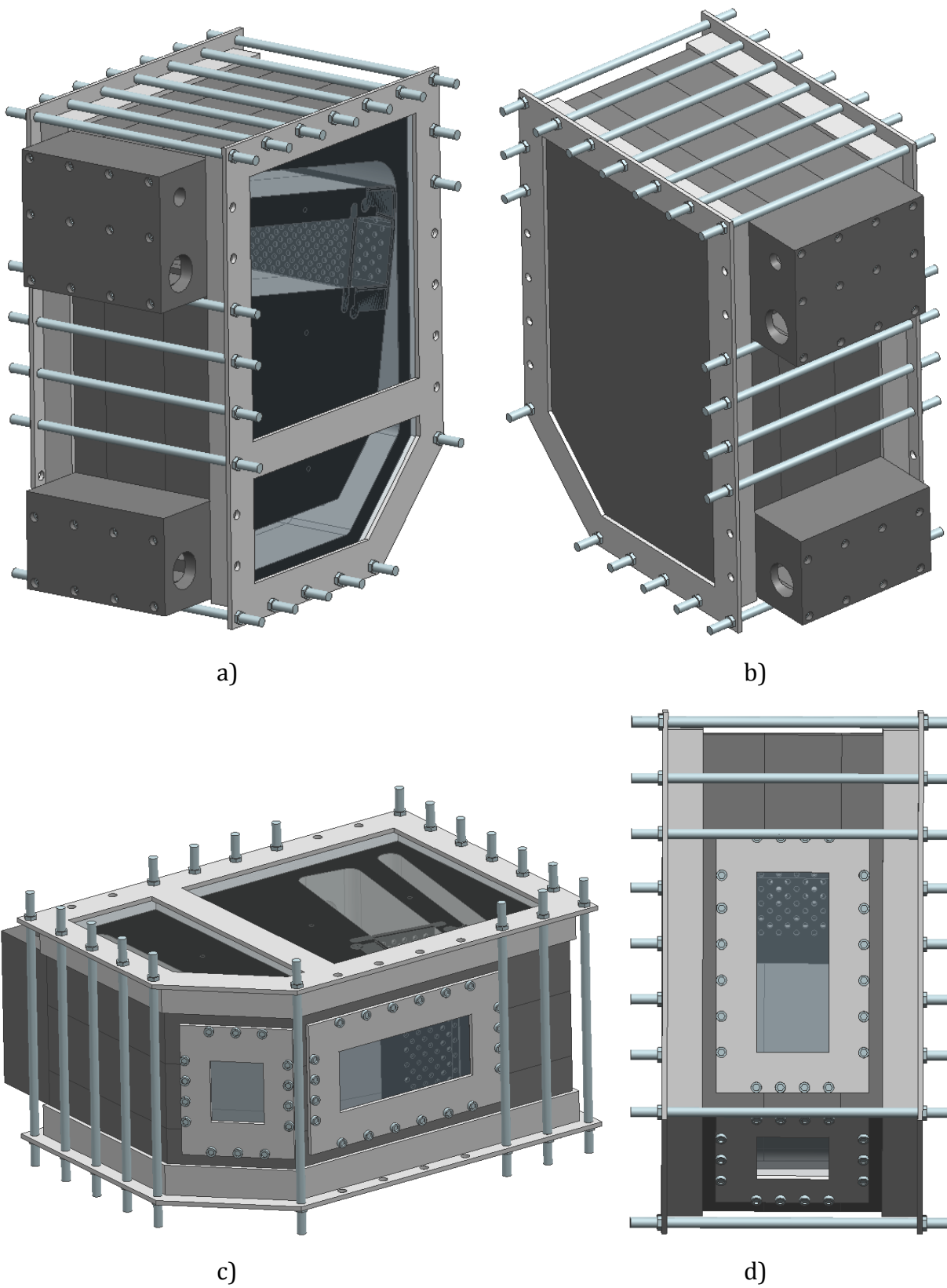


Figure 30 - Version finale du prototype vue a) de côté, b) de derrière, c) de dessous et d) de face

Pour conclure cette section et le chapitre en cours, il faut d'abord rappeler que l'objectif consistait à créer un prototype expérimental dont les caractéristiques se rapprochent le plus possible de la véritable pièce d'intérêt tout en permettant de prendre des mesures par technique de FPIL. De façon générale, les stratégies couramment employées par les fabricants d'équipement d'origine pour surmonter les défis liés à la conception des chambres de combustion à mélange préalable pauvre ont été présentées afin de permettre au lecteur de mieux comprendre le contexte dans lequel s'inscrit cette étude, entre autres. Par la suite, le processus complet ayant permis de concevoir le prototype expérimental et son système hydraulique a été expliqué. Chaque décision a été clairement justifiée, que ce soit par des calculs théoriques, des simulations numériques ou des raisons pratiques.

Chapitre 4 : Résultats

La conception du prototype ayant finalement été achevée au terme d'un long processus itératif et complexe présenté à la section précédente, il fallait ensuite le bâtir. Comme l'objectif spécifique de ce projet de recherche consiste en la création d'un montage expérimental, la construction de ce dernier correspond en soi aux résultats obtenus. Dans cette veine, le chapitre qui suit présentera la construction du prototype expérimental sous forme de résultats. Plus spécifiquement, les différentes étapes réalisées et techniques employées pour y arriver seront décrites. Les explications sont accompagnées d'images pour faciliter la compréhension du lecteur.

4.1 Châssis du prototype

Tel que mentionné, les calculs de dimensionnement du prototype ont permis de déterminer que la distance optimale de l'extrusion linéaire du profil 2D, ou plutôt la largeur du conduit intérieur, était de 8 po (203.2 mm). En incluant la paroi du fond dont l'épaisseur est de 1 po, les dimensions du bloc de PVC à construire qui apparaît à la Figure 23 sont de 18 x 12 x 9 po. Étant donné que la forme du profil à reproduire est relativement complexe et requiert une précision au dixième de millimètre près, il s'avérait impossible de réaliser ce travail manuellement. L'idée consistait donc à utiliser une machine-outil à commande numérique (MOCN) assurée par un ordinateur, une technique appelée *computer numerical control* (CNC) *machining* en anglais. À partir du modèle 3D de la pièce à reproduire qui est fourni au logiciel utilisé, l'usinage complet de la pièce est automatisé. Dans le cadre de ce projet, la machine-outil procédait à la fabrication de la pièce par fraisage, soit par enlèvement de matière grâce à la rotation d'un outil de coupe nommé fraise. Le sous-traitant qui a été mandaté de l'opération est une compagnie appelée Précimax LTD.

Avec la taille du châssis à construire par MOCN se dressaient deux problèmes. Premièrement, un bloc de PVC possédant les dimensions requises s'avérait introuvable chez tous les fournisseurs ayant été contactés. L'épaisseur maximale des plaques de PVC disponibles était de 3 po. Deuxièmement, la longueur maximale de la fraise pouvant être utilisée pour satisfaire les exigences en matière de précision correspondait à 4 po. Plus les fraises sont longues, plus leur diamètre augmente. Par conséquent, il existe une longueur de fraise limite avec lesquels il devient impossible de reproduire certains détails de la pièce. Pour ces raisons, la stratégie employée consistait à décomposer le bloc de PVC en trois plaques de 3 po. Chacune d'entre elles a été usinée séparément en atelier. La Figure 31 montre une photo prise à l'usine de la compagnie Précimax lors de la fabrication de la première plaque de PVC. Contrairement aux deux autres, cette plaque n'a pas été perforée au complet. Le profil 2D a seulement été creusé sur 2 po plutôt que 3 afin de laisser une paroi épaisse de 1 po à son extrémité.

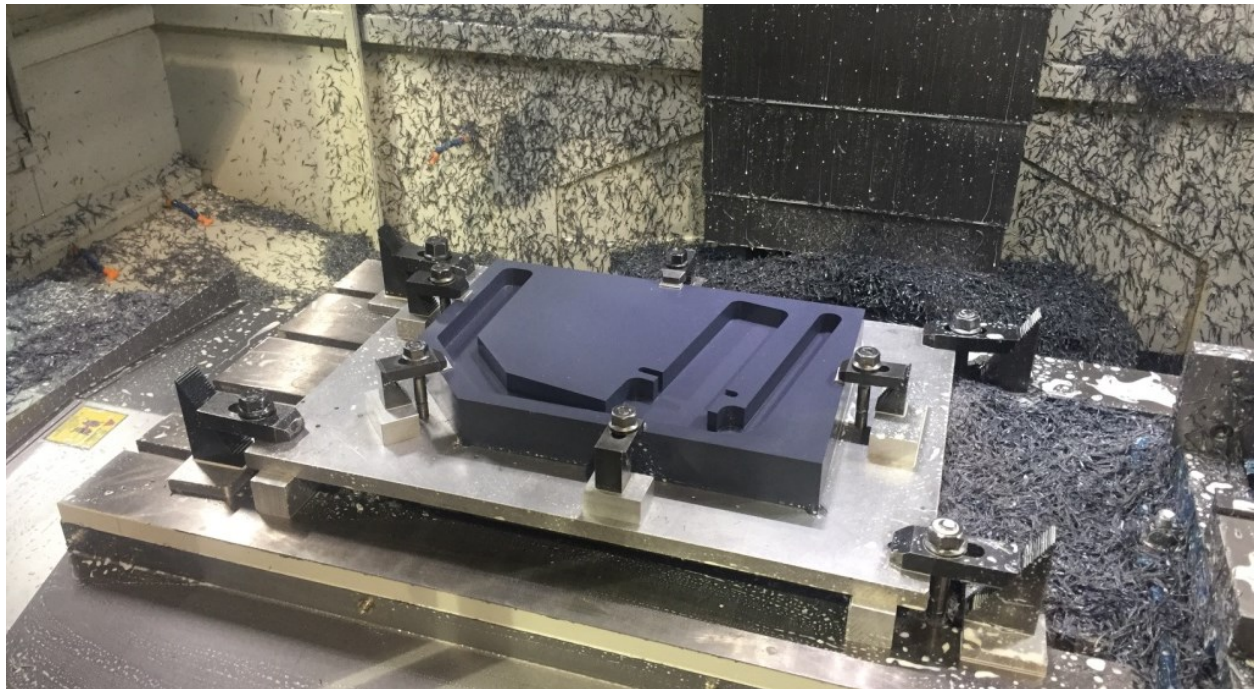


Figure 31 – Plaque de PVC de 3 pouces d'épaisseur usinée à l'atelier de Précimax par machine-outil à commande numérique

La Figure 32 illustre le processus de construction du bloc de PVC, une fois les trois plaques de PVC usinées par MOCN. Sur chacune des plaques ont été percés trois trous à des emplacements identiques à l'intérieur desquels peuvent être insérées des tiges métalliques. Elles assurent un alignement parfait des plaques lorsqu'elles sont emboîtées les unes par-dessus les autres. Pour coller les plaques de façon permanente, un ciment extra fort a été appliqué sur chacune des surfaces horizontales étant appuyées les unes contre les autres.

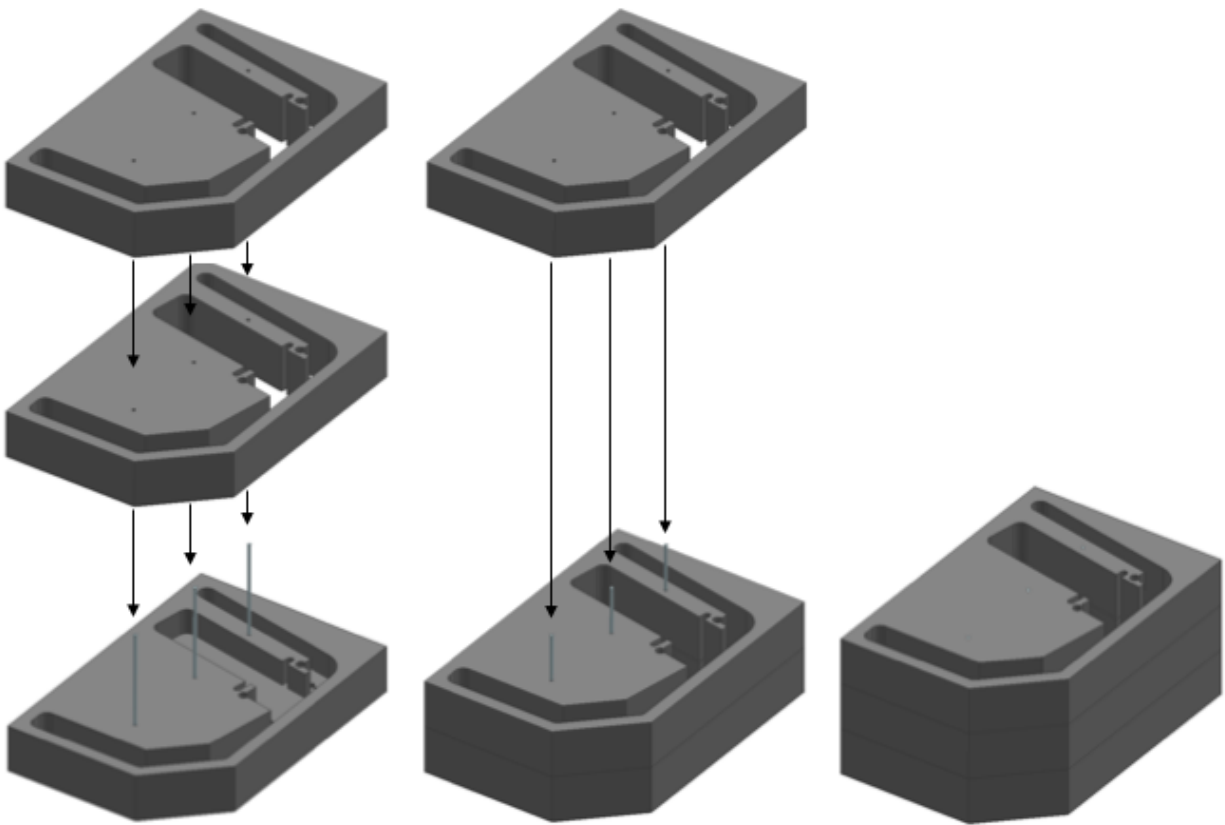


Figure 32 – Procédure ayant servi à empiler les parois une par dessus les autres pour former le châssis du prototype

Lors de cette opération, il était prévu que la colle en excès déborde et forme des coulisses le long des parois intérieures et extérieures du prototype. Sans protection, le plastique en contact direct avec la colle aurait inévitablement été endommagé. Ainsi, il prévalait de recouvrir toutes les parois avec du ruban adhésif avant l'application de la colle, tout comme on peut le voir sur la Figure 33. Une préparation méticuleuse était également

primordiale pour le bon déroulement de cette étape puisque le ciment utilisé figeait en moins de deux minutes. Toutes les manipulations devaient donc être très efficaces.

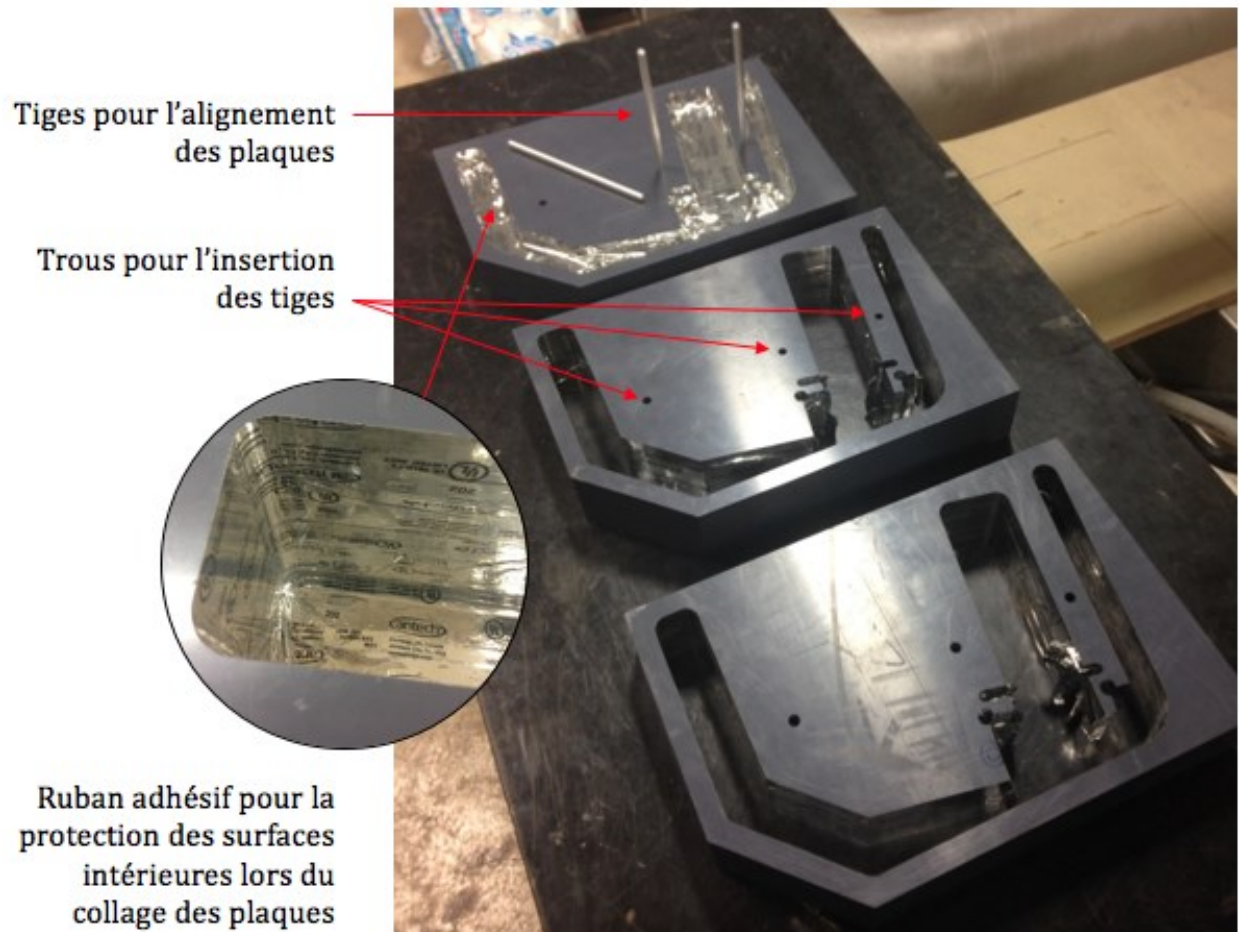


Figure 33 – Plaques de PVC dont les parois intérieures et extérieures ont été protégées avec du ruban adhésif tandis que les surfaces horizontales ont été nettoyées avant l'application de la colle

Pour assurer que la colle soit bien répartie sur toute la superficie des surfaces et que le contact soit adéquat, un poids uniforme a été appliqué sur le dessus des plaques empilées les unes par-dessus les autres à l'aide d'une presse mécanique et laissé ainsi durant 24 heures. La charge a été optimisée de façon à être suffisante pour bien coller les plaques entre elles sans toutefois être trop élevée, ce qui aurait risqué de compresser trop de colle hors des surfaces horizontales en contact.

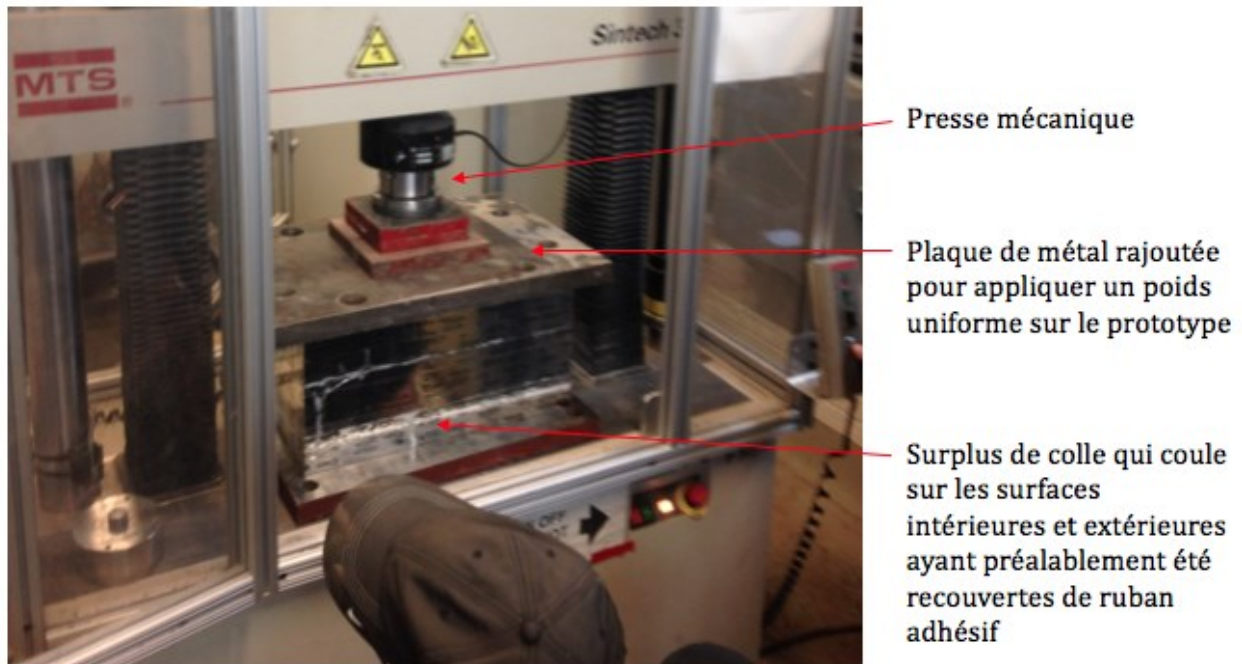


Figure 34 – Presse mécanique utilisée pour appliquer un poids uniforme sur le prototype lors de la période de cure du ciment

Une fois l'opération terminée et la colle séchée, le ruban adhésif a été retiré et les surfaces ont été nettoyées avec un solvant. Le châssis du prototype était alors complété, mais ne comportait toujours pas de trous pour pouvoir poser les fenêtres et les boîtes collectrices ayant été conçues, qui sont observables à la Figure 35. Il a donc été nécessaire d'avoir à nouveau recours à une machine-outil pour les usiner, à la différence que celle-ci était contrôlée manuellement en atelier. Les rainures prévues pour l'insertion des anneaux de caoutchouc ont été créées autour des ouvertures en utilisant la même machine.

Les trous pour les boîtes collectrices ont été perforés avec le même angle que les conduits simulant l'injecteur de combustible et la prise d'air afin d'assurer que l'eau soit dirigée de façon parallèle à leur direction. La machine-outil utilisée est présentée à la Figure 36. Elle possède un banc ajustable dans les trois axes au moyen de manivelles. La pièce à usiner est déposée sur celui-ci à l'aide de supports pour la maintenir en angle, au besoin. La fraiseuse peut bouger verticalement pour retirer le matériel sur toute la profondeur désirée.

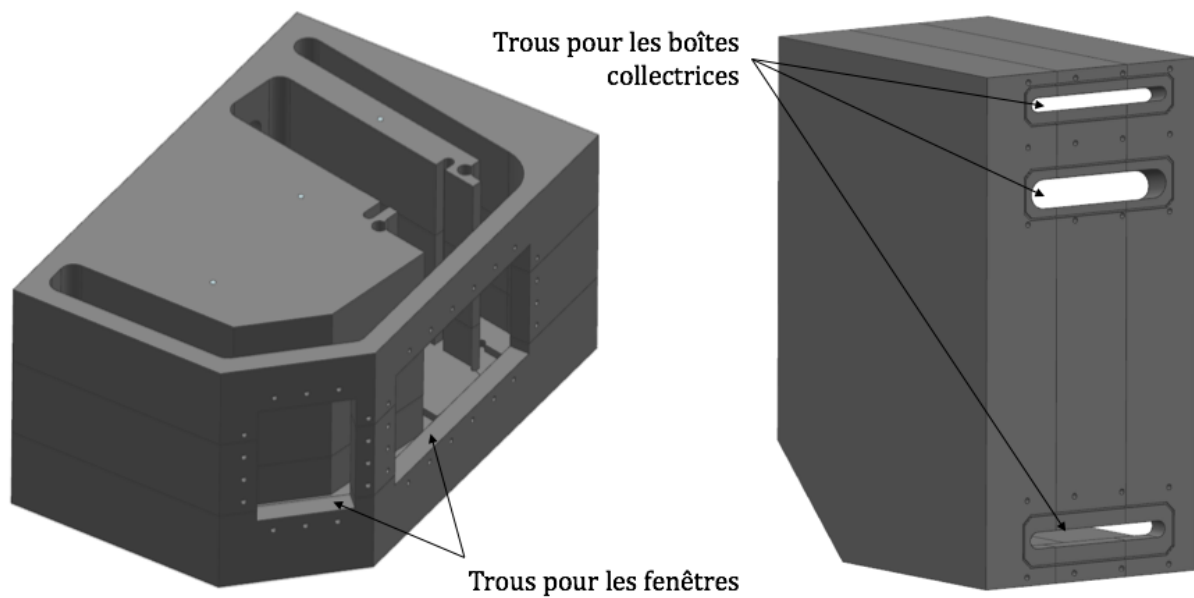


Figure 35 – Trous pour les boîtes collectrices et les fenêtres ayant été découpés du prototype par fraiseuse

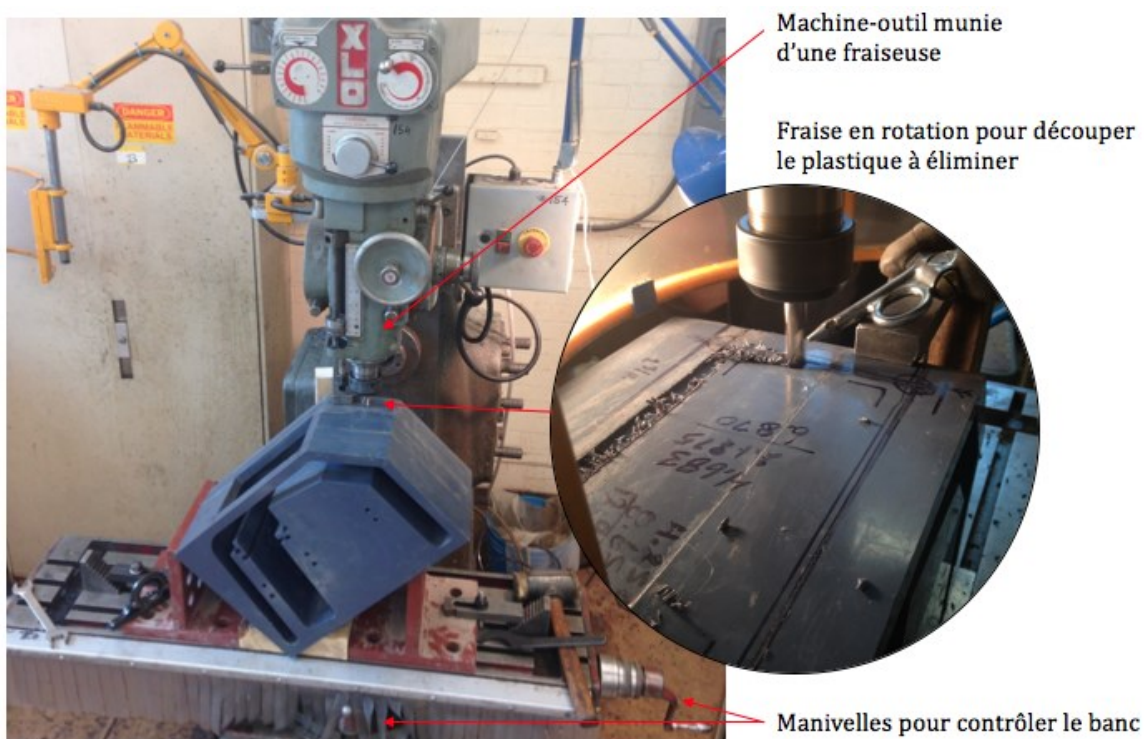


Figure 36 – Machine-outil contrôlée manuellement à l'aide de manivelles et ayant été utilisée pour découper les trous sur le châssis du prototype

4.2 Composantes du prototype

Les cadrages en acier inoxydable présentés à Figure 24 ont été construits à partir de trois barres longues de 6 pieds. À l'aide d'une scie ronde, tous les morceaux ont été coupés aux dimensions requises avec des angles de 45° à chacune de leurs extrémités. Il a été nécessaire d'ajuster l'angle ou la longueur de quelques morceaux pour que la grosseur des cadrages corresponde exactement au contour des fenêtres. L'assemblage permanent des morceaux a été réalisé par soudure. Les joints ont ensuite été sablés en utilisant un fusil à air comprimé projetant un abrasif à grande vitesse pour décaper les imperfections. Toutes ces étapes sont représentées à la Figure 37. Tous les panneaux en verre de borosilicate sont de forme rectangulaire et comportent des dimensions standards à l'exception de celui avec un angle de 45° dans son coin inférieur de droite. Comme il s'avérait impossible de se procurer directement un panneau possédant cette forme et ces dimensions, il a fallu mandater un manufacturier d'instruments en verre, JRV Scientific Glass, de couper un panneau en verre borosilicate aux dimensions requises en utilisant les outils spécialisés dont il disposait.

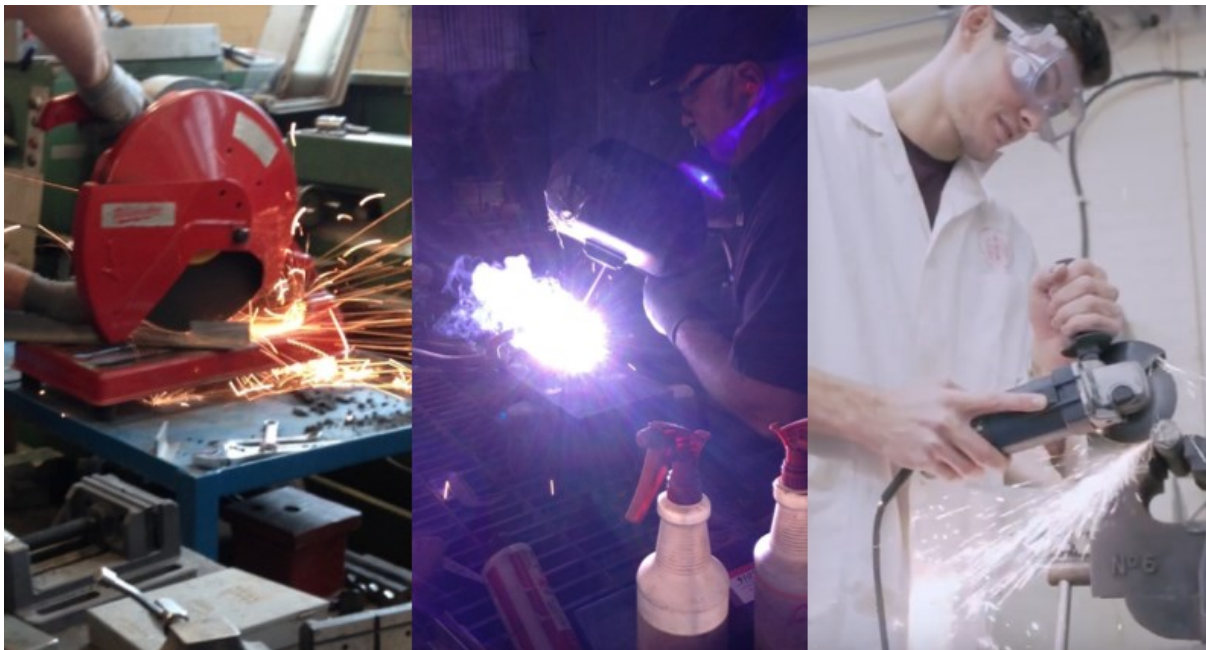


Figure 37 – Construction des cadrages en acier inoxydable par découpage des barres en T (image de gauche), soudage des morceaux découpés (image du centre) et polissage des surfaces pour corriger les imperfections (image de droite)

Une fois les cadrages construits, il fallait poser les fenêtres de manière à ce qu'elles soient hermétiques et à niveau avec la barre de métal qui les soutiennent, comme il a été vu à la Figure 25. En utilisant des appuis pour surélever les plaques en verre borosilicate, il a été possible de faire en sorte qu'elles soient exactement à la même hauteur que leur cadre. Du silicone a alors été injecté dans l'interstice entre les fenêtres et leur cadre, puis laisser sécher pendant 24 heures. Le cadrage a ensuite été retourné pour effectuer la même chose de l'autre côté. Finalement, des trous pour les tiges en métal qui ont pour but de maintenir le prototype fermé ont été faits autour des cadrages. Les cadres ont été parfaitement superposés et soutenus fermement par des pinces en C afin que le patron des trous soient identiques sur chacun des cadres métalliques. Des photos de ces opérations ont été prises dans l'atelier d'usinage et sont affichées à la Figure 38.



Figure 38 – Étapes de construction pour l'installation des fenêtres dans leur cadrage (image de gauche), le collage au silicone (image du centre) et le perçage des trous autour des cadres (image de droite)

Les boîtes collectrices ont ensuite été construites en utilisant les mêmes machines et outils que ceux présentés préalablement. Des plaques de PVC ont d'abord été collées ensemble avec du ciment afin d'obtenir l'épaisseur désirée. Les deux blocs formés ont été taillés aux dimensions requises. La fraiseuse a servi à creuser dans les blocs pour créer les

cavités et les rainures montrées à la Figure 26. Les trous pour la connexion des tuyaux ainsi que pour les vis ont finalement été percés.

L'étanchéité du prototype était un critère très important compte tenu des besoins expérimentaux en termes de débit d'écoulement. Pour empêcher les fuites d'eau de se produire, une feuille de caoutchouc à la forme du profil 2D du prototype a été découpée et posée sur la surface contre laquelle est appuyée la fenêtre principale. De la même façon, des feuilles de caoutchouc rectangulaires comportant des trous aux emplacements de vis sont déposées entre les fenêtres du côté et le prototype. Plusieurs types de caoutchouc ont été testés jusqu'à l'obtention du matériel possédant l'épaisseur optimale après compression, et ce, afin que les surfaces intérieures soient parfaitement lisses en plus d'être hermétiques. Le tout est présenté à la Figure 39.



Figure 39 – Étanchéité du prototype assurée par une feuille de caoutchouc découpée selon la forme du profil 2D et couvrant la surface horizontale sur laquelle est déposée la fenêtre principale (image de gauche), des feuilles de caoutchouc rectangulaire comportant des trous aux emplacements des vis pour les autres fenêtres (image du centre) et des anneaux de caoutchouc (image de droite)

La forme des plaques perforées étant complexe et nécessitant une fine précision, le moyen de fabrication le plus simple et moins dispendieux s'est avéré être l'impression 3D. Le matériel d'impression choisi est de l'ABS. Les paramètres d'impression ont été établis tel

que le remplissage du matériel corresponde à 100%, de sorte que la porosité résultante soit nulle. Les coûts auraient pu être réduits davantage en diminuant cette valeur, mais il était important que l'eau soit contrainte à traverser la plaque perforée en passant par les trous prévus à cet effet et non à travers sa surface solide. Il est prévu qu'une couche de peinture imperméable soit appliquée pour assurer que ce soit bien le cas. L'imprimante utilisée offre une précision de ± 0.2 mm et prend moins de 24 heures pour produire les pièces d'une telle dimension. Les plaques perforées résultantes apparaissent à la Figure 40. Bien que pratique, un inconvénient rattaché au choix de l'impression 3D comme méthode de fabrication des plaques perforées réside dans la rugosité du fini de surface. Cette caractéristique entraîne une augmentation des pertes de charge de l'écoulement des fluides. Il se peut donc que le mélange résultant soit quelque peu favorisé par la rugosité des parois. Un fini de surface plus lisse pourrait être appliqué sur la plaque s'il advenait que les effets soient non négligeables.

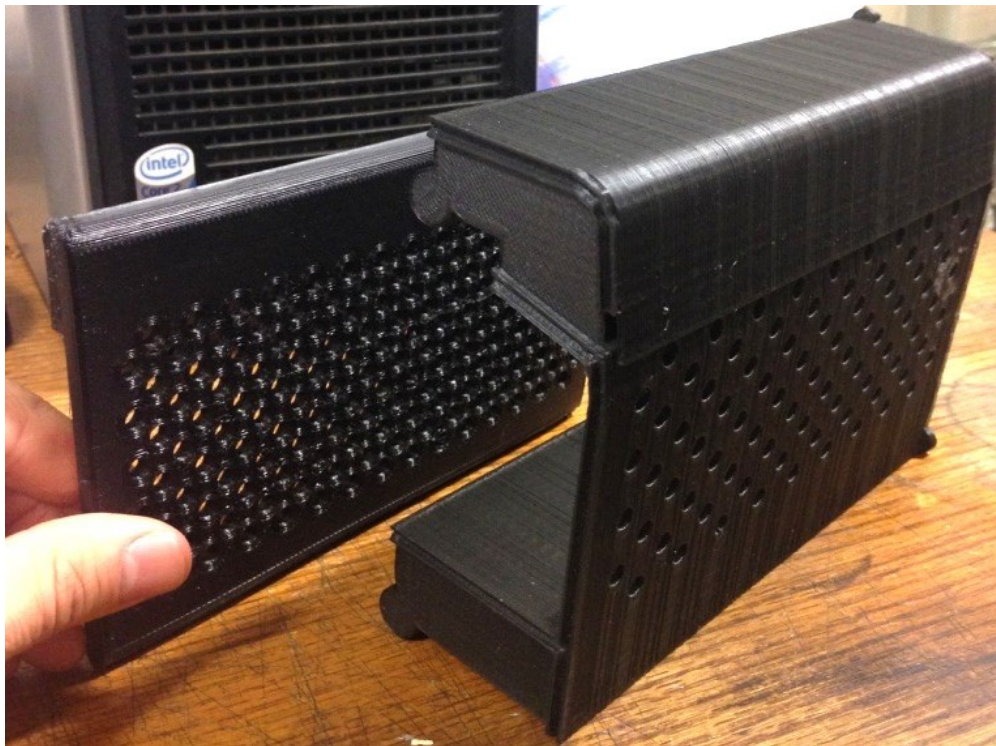


Figure 40 – Plaques perforées imprimées en 3D

4.3 Assemblage du prototype

La prochaine étape consistait à assembler toutes les composantes pour former la version finale du prototype expérimental. Tout d'abord, les plaques perforées en 3D devaient être insérées à l'intérieur du châssis par les fentes prévues à cet effet. Les boîtes collectrices ont ensuite été vissées à l'arrière en prenant soin d'ajouter les anneaux de caoutchouc dans leur rainure avant de procéder. Puis, la feuille de caoutchouc découpée selon la forme du profil 2D a été déposée sur la surface horizontale du prototype, tout comme les deux autres feuilles de caoutchouc rectangulaires isolant les fenêtres du côté, avant de poser les cadrages en acier inoxydable. Finalement, les barres en métal ont été insérées dans les trous des cadrages et maintenues en place par des boulons. Il est possible de démonter et rassembler le prototype lorsqu'il faut changer les plaques perforées à tester entre les expériences. Le processus d'assemblage est schématisé à la Figure 41.

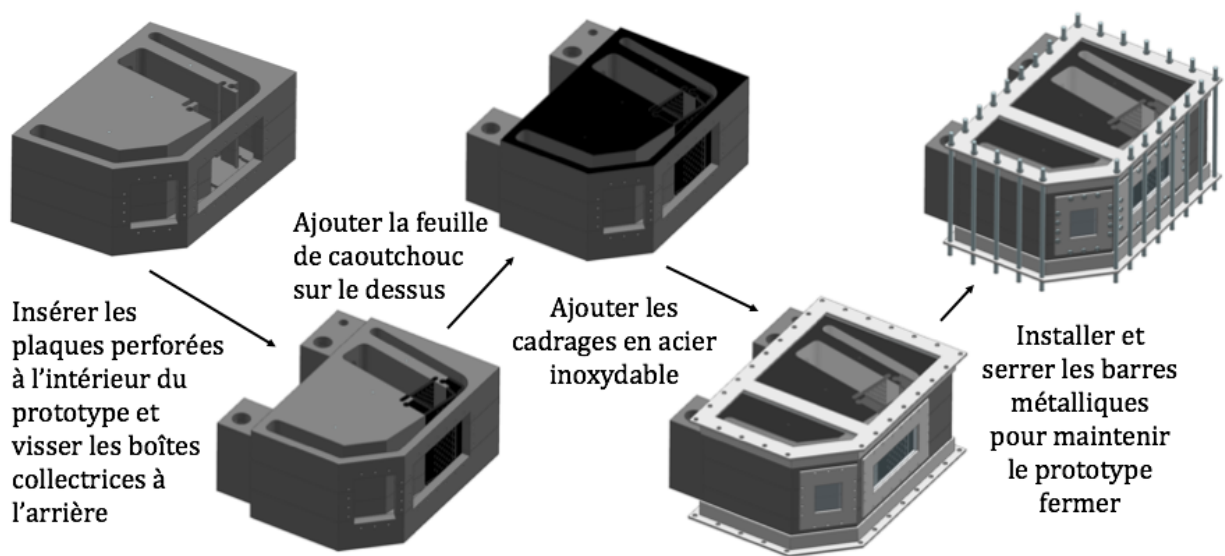


Figure 41 – Étapes d'assemblage des composantes du prototype

Voici, à la Figure 42, à quoi ressemble le prototype final une fois qu'il est assemblé et scellé. Bien qu'hermétique, les panneaux en verre borosilicate ne sont pas résistants aux

impacts. Il faut donc manipuler le prototype avec précaution et éviter la chute d'objets durant les expériences.

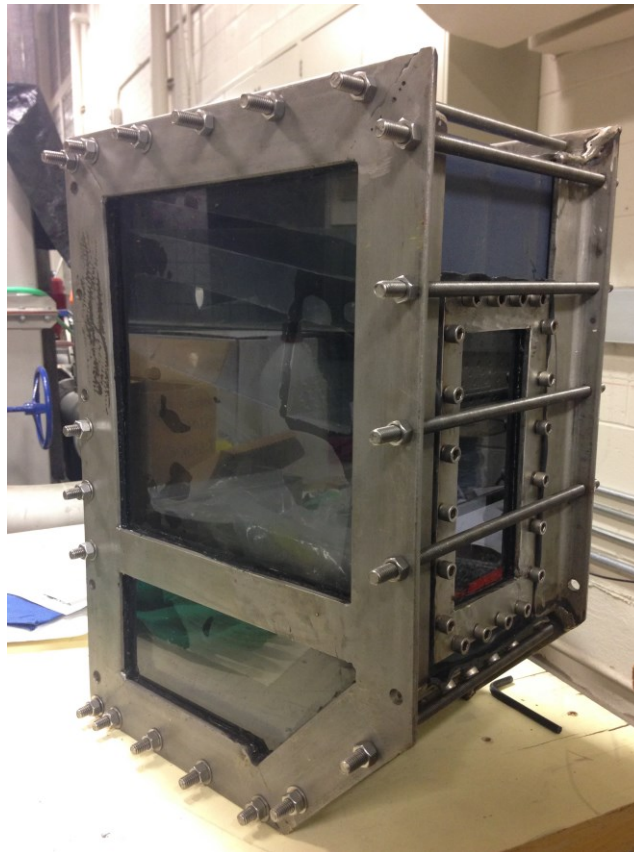


Figure 42 – Prototype final assemblé et scellé

4.4 Installation dans la salle expérimentale

Pour conduire les expériences de FPIL dans la chambre noire, il fallait que le prototype soit déposé sur une surface très stable et solide. En effet, des réflexions indésirables du laser et des déplacements incontrôlés du prototype peuvent être occasionnés par les vibrations des pompes en marche, causant potentiellement un risque pour la sécurité de l'opérateur et pour la validité des résultats obtenus. Une table de deux tonnes située dans le laboratoire a été choisie comme emplacement pour y déposer le

prototype. Il faut savoir que le laser se trouve également sur une table et que l'alignement horizontal du laser, par le moyen de miroirs placés en angle, est beaucoup plus facile que son alignement vertical. Il est donc préférable que le prototype soit exactement à la même hauteur que le laser. Les tables n'étaient cependant pas au même niveau et il s'avérait impossible de les déplacer. D'abord, la première table supporte le laser qui ne doit absolument pas bouger sans quoi d'autres expériences réalisées dans la même salle seraient compromises. Puis, la deuxième table est simplement trop lourde. Pour remédier à la situation, le prototype a été déposé sur un support fixé à la table. Le support en question consistait en un banc capable de bouger horizontalement grâce à deux manivelles. Pour assurer un déplacement vertical ajustable, deux plaques de métal ont été utilisées. Elles sont reliées par quatre tiges de métal qui ont chacune été installées dans un coin différent. Avec un système de boulons, il devenait alors possible de choisir la hauteur à laquelle la plaque du dessus était fixée afin que le prototype et le laser se trouvent au même niveau. Ce système permettait de bouger le prototype dans tous les axes, mais pas de lui donner un angle. Dans l'éventualité où cette opération serait requise pendant les expériences, le prototype a été attaché à quatre tiges dont la longueur est contrôlable au moyen d'un ridoir. Il s'agit d'un dispositif avec des filages inversés à chacune de ses extrémités, auxquelles une tige peut être connectée. En tournant le ridoir, la longueur des tiges se contracte ou se rétracte, dépendamment du sens de rotation. Sans toutefois pouvoir révolutionner le prototype sur 360° , il devenait ainsi possible de lui donner un certain angle pour permettre une orientation optimale du laser ou de la caméra, et ultimement l'obtention de meilleures images. Ce système est représenté à la Figure 43. Le prototype a volontairement été omis de la figure pour mettre l'emphasis sur les détails du banc qui le supporte. Pour sa part, la première plaque, qui en réalité est fixée au banc, a été distancée de celui-ci pour ne pas le cacher. Les flèches bleues indiquent la liberté de mouvement du système.

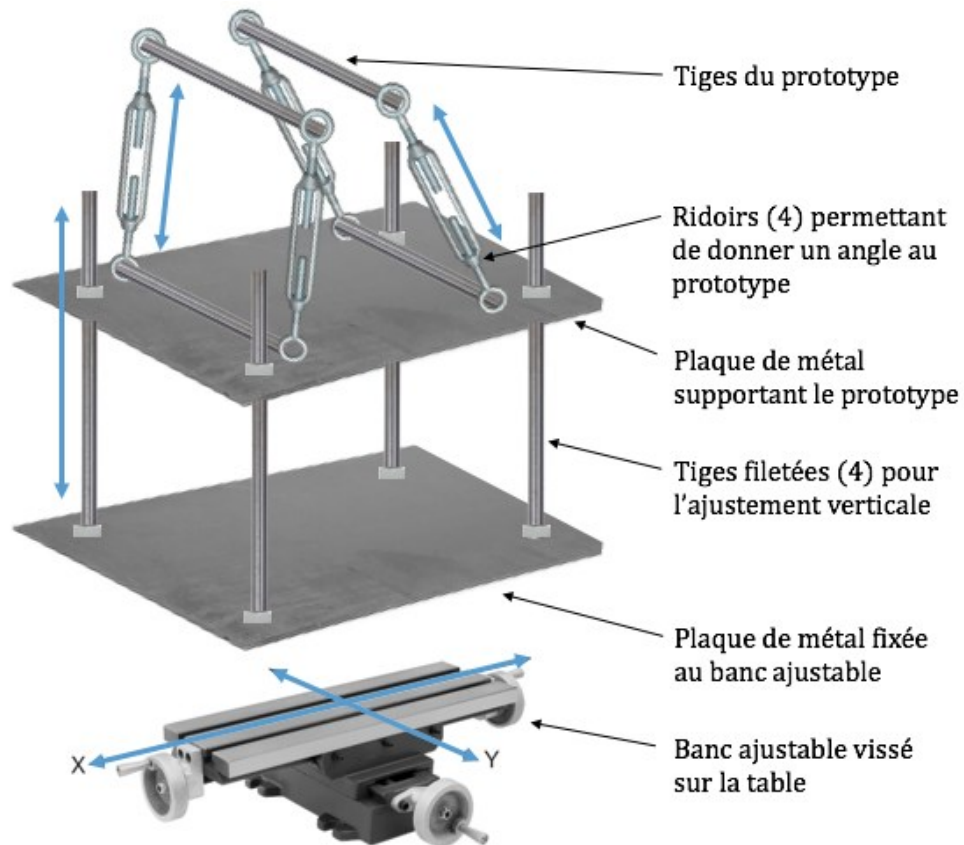


Figure 43 – Support du prototype avec intégration d'un système d'ajustement de sa position

Lorsque vide, le réservoir d'eau mélangée au traceur servant à alimenter le conduit simulant l'injecteur de combustible, tel que présenté à la Figure 29, était assez léger pour être installé sur le dessus du deuxième réservoir. De cette façon, de l'espace était sauvé dans la salle expérimentale relativement restreinte et une plus grande tête d'eau était offerte pour assurer le bon fonctionnement de la pompe. Le système hydraulique qui a été construit est illustré à la Figure 44.

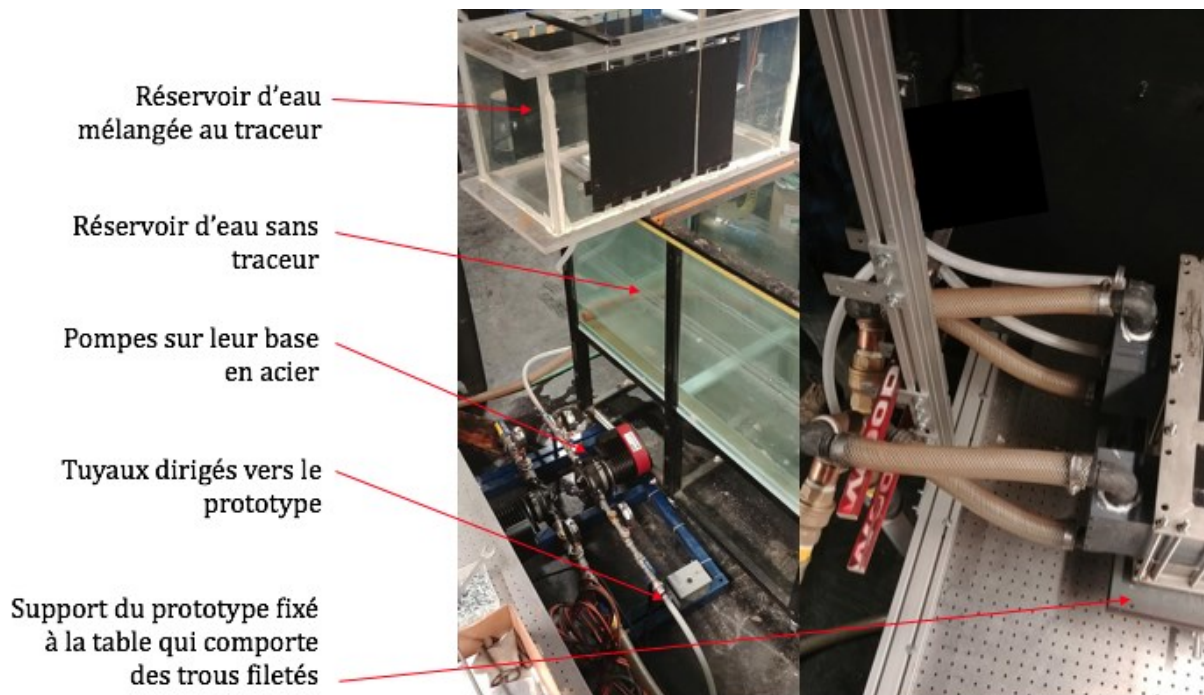


Figure 44 – Système hydraulique dans la chambre noire où les expériences se déroulent

Pour conclure cette section et le chapitre en cours, il faut d'abord rappeler que l'objectif consistait à créer un prototype expérimental dont les caractéristiques se rapprochent le plus possible de la véritable pièce d'intérêt tout en permettant de prendre des mesures par technique de FPIL. De façon générale, les stratégies couramment employées par les fabricants d'équipement d'origine pour surmonter les défis liés à la conception des chambres de combustion à mélange préalable pauvre ont été présentées. Par la suite, le processus complet ayant permis de concevoir le prototype expérimental et son système hydraulique a été expliqué. Chaque décision a été clairement justifiée, que ce soit par des calculs théoriques, des simulations numériques ou des raisons pratiques. Le reste du chapitre a été consacré aux matériaux utilisés et aux techniques employées pour construire le prototype expérimental, son support ajustable et le système hydraulique qui l'alimente. Malgré tous les problèmes encourus qui ont prolongé la durée de ces différentes étapes, l'objectif initial a été atteint avec succès.

Chapitre 5 : Conclusion

Ce chapitre conclue le mémoire en faisant un bref retour sur l'ensemble de l'œuvre. Il comporte à la fois des recommandations pour d'éventuels travaux futurs et pour l'abaissement des émissions de NO_x . Les contributions apportées par cette étude seront finalement énumérées.

5.1 Revue du mémoire

Ce mémoire porte sur l'optimisation des trous d'une plaque perforée dans le but d'améliorer la qualité du mélange qui se produit dans un écoulement transversal en aval de celle-ci. Les motivations à l'origine de ce projet de recherche sont à la fois de nature académique et pratique. Fondamentalement, il existe un intérêt marqué pour tous les phénomènes de turbulence. Ces derniers peuvent être facilement générés à l'aide de plaques perforées dans un tunnel aérodynamique. D'un point de vue pratique, les applications industrielles des plaques perforées sont nombreuses en raison de leur capacité à produire une bonne qualité de mélange sur une courte distance, entre autres. La présente étude s'inscrit dans un contexte de réduction des émissions de NO_x provenant des turbines à gaz aérodérivées qui emploient une stratégie de combustion à mélange préalable pauvre en combustible. L'importance de l'homogénéité du mélange de réactants afin d'assurer le succès de cette technique a d'ailleurs été soulignée à maintes reprises.

Une revue littéraire des sujets les plus pertinents à cette étude a d'abord été réalisée. Les mécanismes de formation des oxydes d'azote ont été expliqués. Les principes de base sur lesquels reposent la stratégie d'abattement des NO_x ont ensuite été présentés. En ce qui concerne les plaques perforées, des caractéristiques prometteuses en vue d'augmenter et d'uniformiser l'intensité de la turbulence qui en résulte ont été vues. La méthode

d'acquisition des données et ses contraintes ont également fait l'objet de considérations théoriques.

La méthodologie entourant le processus de conception et les étapes de construction ayant mené à la réalisation du prototype expérimental et de son système hydraulique a été décrite. Le choix de produire un mélange non réactif lors des expériences en remplaçant l'air et le combustible par de l'eau a été justifié. Les modifications qui ont été apportées à la section de la véritable chambre de combustion permettent de répondre aux besoins en matière d'accès visuel, pour accommoder la technique d'imagerie par FPIL, et d'accès physique, pour interchanger les pièces amovibles entre les différents essais. Le dimensionnement du prototype a été optimisé en fonction des nombreuses contraintes du projet. Des composantes particulières ont été conçues pour rendre l'écoulement uniforme et le prototype étanche. Après s'être procuré les matériaux nécessaires, des techniques de machine-outil à commande numérique, d'usinage en atelier et d'impression 3D ont servi à la construction et l'assemblage des éléments du prototype. Les pompes du système hydraulique ont été choisies de sorte que les nombres de Reynolds de l'écoulement soient supérieurs à 10,000 et que le ratio des vitesses entre les fluides qui composent le mélange à l'intérieur du prototype soit identique à celui retrouvé dans le brûleur. Pour ce faire, il a été calculé que l'eau traversant la plaque perforée, qui agit comme distributrice d'air dans la véritable chambre de combustion, doit posséder un débit correspondant à 3.55 L/s. De son côté, l'eau provenant du conduit supérieur, simulant l'injecteur de combustible, doit se déplacer à un débit de 0.46 L/s. Une fois complété, le système hydraulique a été connecté au prototype, puis dirigé vers le drain. Finalement, un banc mobile servant de support pour le prototype et facilitant l'alignement du laser a été ajouté.

5.2 Recommandations pour travaux futurs

Avec du recul, il paraît évident que les objectifs initiaux du programme de recherche étaient très ambitieux compte tenu du temps et des ressources disponibles. Dans un monde

idéal, l'optimisation des trous d'une plaque perforée servant à homogénéiser le mélange entre l'air et le combustible de la turbine à gaz étudiée aurait sans doute été réalisable si un montage expérimental avait existé dès le départ. Toutefois, au moment de former un partenariat entre l'Université McGill et la compagnie Siemens, seule la méthode d'acquisition des données avaient été choisies. Il fallait donc débiter par la conception du système répondant aux besoins opérationnels du projet, l'obtention des pièces nécessaires, la construction et l'assemblage des différentes composantes, suivi de leur installation dans la salle expérimentale. À la lumière du travail accompli, il est facile de constater que ces étapes constituaient un projet de maîtrise en soi. Par conséquent, il y a encore plusieurs étapes à franchir avant l'atteinte de l'objectif ultime qui consiste à réduire les émissions d'oxydes d'azote provenant de la TGA à l'étude et la présente section vise à guider les travaux futurs.

Maintenant que le système hydraulique fonctionne et que le prototype expérimental est étanche, il faut mettre en place les installations optiques requises pour la FPIL. Il est prévu qu'une caméra avec dispositif à transfert de charges de modèle PCO 1600 soit utilisée avec un intensificateur d'images et un filtre pour capter la fluorescence du traceur. La caméra sera connectée à un ordinateur muni d'un logiciel servant à enregistrer les images. Le traceur fluorescent préconisé pour les expériences est la rhodamine 6G. La source d'excitation consiste en un laser à argon ionisé de 5W. Puisque son emplacement dans la salle expérimentale est situé loin du prototype, il sera nécessaire d'aligner son rayon laser jusqu'au prototype au moyen de plusieurs miroirs. Étant donné qu'un mur force la déviation du rayon inutilement et dangereusement vers la station de contrôle des pompes du système hydraulique, l'idée de percer un trou dans le mur pour permettre son passage direct a été envisagée. De plus, il faudra ajouter des lentilles cylindriques entre le dernier miroir et le prototype pour procéder à l'élargissement du rayon laser sous forme de plan lumineux. Évidemment, la position du prototype expérimental sera ajustée en fonction du plan d'intérêt pour la caractérisation du mélange. Le support du prototype permettra de le coucher, de le placer debout ou même en angle selon les besoins.

L'acquisition de données par technique de FPIL requiert d'abord une procédure de calibration. Pour ce faire, un contenant à l'intérieur duquel les concentrations homogènes de

traceur sont connues et progressivement augmentées devra être illuminé par le laser. Les images seront simultanément captées à l'aide de la caméra. Pour chaque valeur de concentration choisie, une série d'images sera obtenues. Un logiciel de programmation servira à traiter les images, pixel par pixel, pour leur attribuer une valeur d'échelle de gris moyenne. Ainsi, les courbes de calibration, qui correspondent à la concentration du traceur (C) en fonction de l'intensité lumineuse de la fluorescence (I), pourront être tracées. La forme de ces courbes apparaît à l'Équation 14, au sein de laquelle $\mathcal{A}$ & $\mathcal{B}$ représentent des constantes d'ajustement, ou plutôt la pente et l'ordonné à l'origine de la droite, respectivement.

$$C(I) = \mathcal{A}I + \mathcal{B}$$

Équation 14 – Format de l'équation correspondant aux courbes de calibration

Avant de mener les expériences, il sera important de valider les caractéristiques de l'écoulement. Les pompes devront être programmées de sorte que les débits fournis correspondent à ceux requis. Il faudra également prévoir quelques heures pour remplir les deux réservoirs d'eau à l'aide d'un tuyau d'arrosage. La rhodamine 6G, dont la quantité aura été prédéterminée en fonction de la concentration souhaitée, sera ajoutée au volume d'eau connu. La recirculation du mélange sera effectuée pendant quelques minutes pour assurer qu'il soit parfaitement homogène. Pour ce faire, il suffira de fermer la valve menant au prototype expérimental (valve #2) et ouvrir celle qui renvoie le fluide de la pompe vers le réservoir (valve #1) tel qu'illustré sur la représentation du système hydraulique à la Figure 29. Le laser devra être mis en marche au moins 30 minutes avant le début des essais pour laisser le temps au système de se réchauffer et d'atteindre sa puissance de base.

Une fois tous les préparatifs achevés, le déroulement des essais consistera à pomper l'eau des deux réservoirs vers le prototype en respectant les conditions d'opération préétablies. Un court délai d'environ 30 secondes après la mise en marche des pompes permettra à l'écoulement de se stabiliser, à la suite duquel la prise d'images de FPIL pourra débuter. Bien que le volume d'eau des réservoirs soit suffisant pour que les expériences

durent plus de 8 minutes, l'acquisition de données pendant quelques minutes suffira amplement. En effet, si les conditions hydrauliques sont maintenues constantes, il faut s'attendre à ce que les fluctuations spatiales de la concentration des fluides dans le conduit de mélange soient beaucoup plus importantes que les fluctuations temporelles. Au terme de l'essai, il faudra éteindre le laser, les pompes et la caméra.

Le traitement des données obtenues se fera encore une fois par logiciel de programmation. La courbe de calibration sera utilisée pour analyser la série d'images acquises. Tout d'abord, chaque image sera subdivisée en un nombre égal de pixels. Les pixels situés hors de la zone d'intérêt pourront être éliminés pour alléger les calculs. Les autres seront comparés individuellement à la courbe de calibration pour convertir la valeur de leur échelle de gris en concentration du traceur. Une moyenne temporelle sur l'ensemble des images obtenues pendant la durée d'un essai sera calculée pour chacun de ces pixels. Avec cette information, il sera possible de calculer d'autres paramètres, comme le coefficient de non-uniformité associé à chaque plaque perforée, afin de déterminer la qualité du mélange associé. Entre chaque essai, les réservoirs devront être vidangés et soigneusement nettoyés, particulièrement celui contenant le traceur fluorescent, dans le but d'éviter que des résidus demeurent. Au besoin, les plaques perforées ayant été imprimées en 3D pourront être changées en démontant le prototype.

Pour réduire le nombre de tests nécessaires à l'optimisation des trous de la plaque perforée, les analyses de mécanique des fluides numériques pourront être effectuées de façon conjointe, que ce soit pour valider certaines décisions ou orienter la recherche. À ce stade, il est difficile d'anticiper l'issue des expériences et, conséquemment, d'établir un plan très précis pour guider le choix des plaques à tester. Certaines écoles de pensées préconiseraient une procédure très méthodique où les rangées de trous seraient optimisées à tour de rôle, d'une plaque à l'autre, jusqu'à l'obtention d'un résultat final. Bien que garante d'un certain succès, cette stratégie risquerait cependant de limiter la créativité de la solution et d'augmenter inutilement le nombre total d'essais requis. C'est pourquoi une autre suggestion réside dans la création d'une quantité limitée de plaques à tester ayant préalablement été conçues d'après la revue littéraire du sujet et l'intuition d'un bon

jugement. Les résultats dicteraient ensuite les pistes les plus prometteuses étant digne de recherche approfondie.

5.3 Recommandations théoriques

En ce qui concerne les caractéristiques des plaques perforées, Liu et al. (2004) ont suggéré qu'une solidité de 35% offrait l'intensité de turbulence la plus uniforme, et donc le mélange le plus homogène, parmi les valeurs qu'ils ont testées. Liu et Ting (2007) ont avancé qu'une plaque mince de seulement 6 mm d'épaisseur comportant des trous de forme conique avec un angle intérieur de 41° procurait une intensité de turbulence 25% supérieure à celle d'une plaque plus épaisse dont les trous étaient rectilignes. À partir de ces prémices, une plaque perforée qui incorpore toutes les caractéristiques évoquées ci-haut a été conçue et est présentée à la Figure 45. L'axe de symétrie du patron de trous se retrouve centré au milieu de la plaque. La distance entre les parois et la première colonne de trou, m , est la même de chaque côté. Bref, il faut s'attendre à une amélioration significative du mélange avec la réalisation de ces simples changements. Cette plaque perforée représente sans contredit une candidate ayant beaucoup de potentiel pour la réduction des émissions de NO_x .

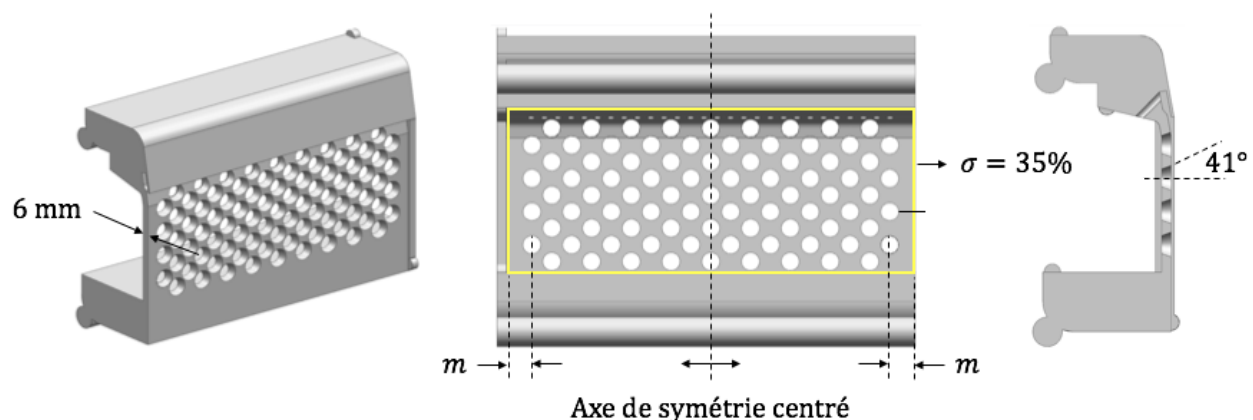


Figure 45 – Configuration d'une plaque perforée incorporant les caractéristiques optimales de différentes études expérimentales ayant été réalisées

Cette étude se concentre principalement sur la configuration des trous présents sur les plaques perforées du réseau de distribution d'air. Il paraît évident que leur optimisation entraînera une homogénéisation du mélange d'air et de combustible résultant. Or, tout porte à croire que le coefficient de non-uniformité du mélange obtenu pourrait être davantage réduit, en parallèle, par la modification des injecteurs de combustible. Les analyses de mécanique des fluides numérique montrant les lignes de courant du combustible dans la chambre de combustion, qui n'ont pas été présentées pour des raisons de confidentialité, semblent appuyer cette idée. Par ailleurs, Snyder et al. (1994) suggèrent que l'emplacement des injecteurs de combustible et la grosseur initiale des gouttes de combustible injectées, dont le diamètre optimal s'est avéré correspondre à 40 microns pour les conditions de leurs expériences, sont des facteurs déterminants sur l'uniformité du mélange entre l'air et le combustible, contrairement au nombre d'injecteurs et à la méthode d'injection. Il serait intéressant d'ajouter ces paramètres en complément à ceux faisant déjà partie de l'étude.

L'ajout d'un dispositif de mélange inspiré de ceux utilisés dans les études de Prière et al. (2004) ou Krämer et al. (1999) est certainement une avenue qui a le potentiel de réduire encore davantage les émissions de NO_x .

En plus des expériences de FPIL, des données sur la vitesse de l'écoulement dans le plan étudié pourrait également être obtenues grâce à la technique de VIP. De cette manière, il serait possible d'appliquer la méthode qui a été développée par Sangl et ses collègues (2014) afin de prédire analytiquement les émissions de NO_x qui en résulterait.

5.4 Contributions de l'étude

Ce projet de recherche a mené à la matérialisation d'un prototype expérimental représentant une section de la véritable chambre de combustion d'une TGA développée par Siemens. Même si les données expérimentales n'ont pas encore été obtenues, un montage

adapté à la technique de FPIL est présentement en place. Il a le potentiel d'être utilisé pour étudier la génération de turbulence à l'aide de plaques perforées. La littérature comprend actuellement peu de travaux sur les caractéristiques des plaques favorisant l'intensité de la turbulence. Il serait intéressant de tester différents patrons, diamètres et formes de trous tout en faisant varier l'épaisseur et la configuration des plaques perforées. Ces résultats ont le potentiel de contribuer à l'étude fondamentale des phénomènes de turbulence ainsi qu'à la recherche appliquée pour améliorer le mélange des réactants dans une chambre de combustion spécifique, ce qui réduirait ses émissions de NO_x.

Le mémoire présente les étapes à suivre pour des travaux futurs, dans l'éventualité où le projet devait être mené à terme. Entre temps, des recommandations théoriques basées sur une revue littéraire du sujet ont été proposées à la compagnie Siemens pour atteindre leur objectif ultime.

De toute évidence, l'utilisation des turbines à gaz continuera d'augmenter pour encore plusieurs décennies à venir. Il est donc primordial de trouver des solutions efficaces pour réduire leurs émissions de polluants, sans quoi les conséquences sur la santé humaine et l'environnement seront catastrophiques. Selon l'Organisation mondiale de la Santé, il y a actuellement sept millions de personnes qui meurent chaque année à cause de la pollution de l'air (Organisation mondiale de la Santé, 2018). Ce problème s'avère très préoccupant et ne fera que s'aggraver à moins que des actions concrètes ne soient entreprises rapidement. À cet égard, il est du moins encourageant de constater qu'un chef de file mondial en matière de fabrication d'équipement d'origine comme Siemens consacre autant d'efforts à diminuer l'empreinte environnementale de leurs turbines à gaz par le biais de projets comme celui-ci.

Références

AIE. (2017). *World Energy Outlook 2017*. Agence Internationale de l'Énergie.

Baumgartner, G., Boeck, L., & Sattlemayer, T. (2016). Experimental investigation of the transition mechanism from stable flame to flashback in a generic premixed combustion system with high-speed micro-particle image velocimetry and micro-PLIF combined with chemiluminescence imaging. *Journal of Engineering for Gas Turbines Power*, 138 (2).

Bender, W. R. (2006). *Lean-Premixed Combustion*. (National Energy Technology Laboratory) Récupéré sur <https://www.netl.doe.gov/File%20Library/Research/Coal/energy%20systems/turbines/handbook/3-2-1-2.pdf>

Benim, A. C., & Syed, K. J. (2014). *Flashback Mechanisms in Lean Premixed Gas Turbine Combustion*. Academic Press.

Boxx, I., Stöhr, M., Carter, C., & Meier, W. (2010). Temporally resolved planar measurements of transient phenomena in a partially pre-mixed swirl flame in a gas turbine model combustor. *Combustion and Flame* (157), 1510-1525.

Bozzelli, J., & Dean, A. (1995). O + NNH: A Possible New Route for NO_x Formation in Flames. *International Journal of Chemical Kinetics* (27), 1097-1109.

Bresson, A. (2000). *Techniques d'imagerie quantitatives: fluorescence induite par laser appliquée aux écoulement et aux combustions*. Thèse de doctorat, Université de Rouen.

Cai, J., Dinger, M., Li, W., Carter, C., Ryan, M., & Tong, C. (2011). Experimental study of three-scalar mixing in a turbulent coaxial jet. *Journal of Fluid Mechanics* (685), 495-531.

Dahm, W., & Dimotakis, P. (1987). Measurements of entrainment and mixing in turbulent jets. *AIAA journal* (25), 1216-1223.

Danckwerts, P. V. (1958). *The Effect of Incomplete Mixing on Homogeneous Reactions* (Vol. 8). Chemical Engineering Science.

Darcy, H. (1857). *Recherches expérimentales relatives au mouvement de l'eau dans les tuyaux*. Paris: Mallet-Bachelier.

Davis, L., & Black, S. (2000). (GER-3568G, Éditeur) Récupéré sur GE Power Systems: https://www.gepower.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en_US/documents/technical/ger-3568g-dry-low-nox-for-hdgt.pdf

Day, M. A. (2004). The No-Slip Condition of Fluid Dynamics. *Erkenntnis*, 3 (33), 285-296.

Deadorff, J. (1970). A Numerical Study of Three-dimensional Turbulent Channel Flow at Large Reynolds Numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 41 (2), 453-480.

Dowling, D., & Dimotakis, P. (1990). Similarity of the concentration field of gas-phase turbulent jets. *Journal of Fluid Mechanics* (218), 109.

Drake, M., & Blint, R. (1991). Relative importance of nitric oxide formation mechanisms in laminar opposed-flow diffusion flames. *Combustion and Flame*, 83 (2), 185-203.

Drake, M., Ratcliff, J., Blint, R., Carter, C., & Laurendeau, N. (1990). Measurements and Modeling of Flamefront NO Formation and Superequilibrium Radical Concentrations in Laminar High-Pressure Premixed Flames. *Proceedings of the Combustion Institute* (23), 387-395.

Fenimore, C. (1971). Formation of Nitric Oxide in Premixed Hydrocarbon Flames. *Proceedings of the Combustion Institute* (13), 373-380.

Galeazzo, F., Donnert, G., Habisreuther, P., & Zarzalis, N. (2011). Measurement and Simulation of Turbulent Mixing in a Jet Crossflow. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 133.

Galley, D., Ducruix, S., Lacas, F., & Veynante, D. (2011). Mixing and stabilization study of a partially premixed swirling flame using laser induced fluorescence. *Combustion and Flame* (158), 155-171.

Gaskin, S. (1995). *Single Buoyant Jets in a Crossflow and the Advected Line Thermal*. PhD thesis, University of Canterbury.

- Gaskin, S., & Wood, I. (2001). Flow structure and mixing dynamics of the advected line thermal. *Journal of Hydraulic Research*, 5 (39), 459-468.
- Glassman, I., & Yetter, R. A. (2008). *Combustion* (éd. 4). Academic Press.
- Guilbault, G. (1973). *Practical fluorescence: Theory, methods, and techniques*. Marcel Dekker, INC.
- Guillard, F., Fritzson, R., Revstedt, J., Trägårdh, C., Aldén, M., & Fuchs, L. (1998). Mixing in a confined turbulent impinging jet using planar laser-induced fluorescence. *Experiments in Fluids* (25), 143-150.
- Heeger, C., Gordon, R., Tummers, M., Sattelmayer, T., & Dreizler, A. (2010). Experimental analysis of flashback in lean premixed swirling flames: upstream flame propagation. *Exp Fluids* (49), 853-863.
- Igoe, B. (2008). *Dry Low Emissions Experience Across the Range of Siemens Small Industrial Gas Turbines*. (Siemens AG) Récupéré sur <https://www.energy.siemens.com/ru/pool/hq/energy-topics/pdfs/en/techninal%20paper/Dry%20Low%20Emissions%20Experience.pdf>
- Jetté, F.-X. (2016). Low Emissions Technology for Aero-derivative Gas Turbine. *Talk Given at McGill University as Part of the Air Pollution Engineering Course (MECH-534)*. Montreal: Siemens AG.
- Klippenstein, S., Harding, L., Glarborg, P., & Miller, J. (2011). The Role of NNH in NO Formation and Control. *Combustion and Flame* (158), 774-789.
- Koochesfahani, M. (1984). *Experiments on turbulent mixing and chemical reactions in a liquid mixing layer*. PhD thesis, California Institute of Technology.
- Krämer, H., Dinkelacker, F., Leipertz, A., Poeschl, G., Huth, M., & Lenze, M. (1999). Optimization of the mixing quality of a real size gas turbine burner with instantaneous planar laser-induced fluorescence imaging. *International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition*. Indianapolis, Indiana: Institute of Technical Thermodynamics.
- Kulkarni, A. K. (2007). Radiative and Total Heat Feedback from Flames to Surface in Vertical Wall Fires. *Experimental Heat Transfer*, 3 (4).

- Lavertu, T. (2008). *Differential diffusion in a turbulent jet*. PhD thesis, McGill University.
- Lavertu, T., Mydlarski, L., & Gaskin, S. (2008). Differential diffusion of high-Schmidt-number passive scalars in a turbulent jet. *Journal of Fluid Mechanics* (612), 439-475.
- Lefebvre, A., & Ballal, D. (2010). *Gas Turbine Combustion* (éd. 3rd edition). CRC Press.
- Lieuwen, T., & Yang, V. (2013). *Gas turbine emissions*. Cambridge University Press.
- Liptak, B. G. (1995). *Instrument Engineers' Handbook* (éd. 3rd Edition: Process Measurement and Analysis, Vol. 1). Elsevier Science & Technology.
- Liu, R., & Ting, D. (2007). Turbulent Flow Downstream of a Perforated Plate: Sharp-Edged Orifice Versus Finite-Thickness Holes. *Journal of Fluids Engineering* , 129, 1164-1171.
- Liu, R., Ting, D., & Rankin, G. (2004). On the generation of turbulence with a perforated plate. *Experimental Thermal and Fluid Science* (28), 307-316.
- Lozano, A., Yip, B., & Hanson, R. (1992). Acetone: a Tracer for Concentration Measurements in Gaseous Flows by Planar Laser-Induced Fluorescence. *Experiments in Fluids* (13), 369-376.
- Lyons, V. J. (1981). Effect of Fuel-Air-Ratio Nonuniformity on Emissions of Nitrogen Oxides. *NASA Technical Paper*, 1798 .
- Meier, W., Weigand, P., Duan, X., & Giezendanner-Thoben, R. (2007). Detailed characterization of the dynamics of thermoacoustic pulsations in a lean premixed swirl flame. *Combustion and Flame* (150), 2-26.
- Merryman, E., & Levy, A. (1975). Nitric Oxide Formation in Flames: The Role of NO₂ and Fuel Nitrogen. *Fifteenth Symposium (International) on Combustion* (pp. 1073-1083). Pittsburgh, PA: The Combustion Institute.
- Milanovic, G. (2017). *The Developing Region of a Turbulent Coaxial Jet*. Master's Thesis, McGill University.
- MSSS. (2018). *Prévenir les intoxications au monoxyde de carbone*. (M. d. Québec, Producteur) Récupéré sur <http://sante.gouv.qc.ca/conseils-et-prevention/prevenir-les-intoxications-au-monoxyde-de-carbone/>

Nicol, D., Malte, P., Lai, J., Marinov, N., & Pratt, D. (1992). NO_x Sensitivities for Gas Turbine Engines Operated on Lean-Premixed Combustion and Conventional Diffusion Flames. *ASME Paper 92-GT-115*.

Organisation mondiale de la Santé. (2018, May 2). *9 out of 10 people worldwide breathe polluted air, but more countries are taking action*. Consulté le July 13, 2018, sur <http://www.who.int/fr/news-room/detail/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>

Perez-Alvarado, A. (2016). *Effect of background turbulence on the scalar field of a turbulent jet*. PhD thesis, McGill University, Civil Engineering and Applied Mechanics.

Pope, S. (2000). *Turbulent Flows*. Cambridge University Press.

Prière, C., Gicquel, L., Kaufmann, P., Krebs, W., & Poinso, T. (2004). LES predictions of mixing enhancement for Jets In Cross-Flows. *Journal of Turbulence*, 5.

Reynolds, O. (1883). An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous and of the law of resistance in parallel channels. *Proc. R. Soc. Lond.* (35), 84-99.

Sagaut, P. (2001). *Large Eddy simulation for incompressible flows*. New York: Springer.

Sangl, J., Mayer, C., & Sattelmayer, T. (2014). Prediction of the NO_x Emissions of a Swirl Burner in Partially and Fully Premixed Mode on the Basis of Water Channel Laser Induced Fluorescence and Particle Image Velocimetry Measurements. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 136.

Saylor, J. (1995). Photobleaching of disodium fluorescein in water. *Experiments in Fluids* (18), 445-447.

Saylor, J., & Sreenivansan, K. (1998). Differential diffusion in low Reynolds number water jets. *Physics of Fluids*, 5 (10), 1135-1146.

Schlichting, H. (1979). *Boundary Layer Theory* (éd. 7th edition). New York: McGraw-Hill.

Schobeiri, M. T. (2010). *Fluid Mechanics for Engineers: A Graduate Textbook*. Springer.

- Schumaker, S., & Driscoll, J. (2012). Mixing properties of coaxial jets with large velocity ratios and large inverse density ratios. *Physics of Fluids* (24).
- Siemens. (2014). *The Industrial Trent 60 Gas Turbine*. Récupéré sur Siemens AG: <https://www.energy.siemens.com/co/pool/hq/power-generation/gas-turbines/Trent-60/gas-turbine-industrial-trent-60-brochure-en.pdf>
- Smagorinsky, J. (1963). General Circulation Experiments with the Primitive Equations: I. The Basic Experiment. *Monthly Weather Review* , 91 (3), 99-164.
- Smalley, P. J. (2011). Laser Safety: Risks, Hazards, and Control Measures. *Laser Therapy* , 20 (2), 95-106.
- Snyder, T., Rosfjord, T., McVey, J., & Chiappetta, L. (1994). Comparison of liquid fuel/air mixing and NO_x emissions for a tangential entry nozzle. *ASME Paper 94-GT-283* .
- Stöhr, M., Boxx, I., & Carter, C. M. (2011). Dynamics of lean blowout of a swirl-stabilized flame in a gas turbine model combustor. *Proceedings of the Combustion Institute* (33), 2953-2960.
- Tanahashi, M., Taka, S., Shimura, M., & Miyauchi, T. (2008). CH double-pulsed PLIF measurement in turbulent premixed flame. *Exp Fluids* (45), 323-332.
- Tennekes, H., & Lumley, J. (1972). *A First Course in Turbulence*. The MIT Press.
- Villiermaux, E., & Rehab, H. (2000). Mixing in coaxial jets. *Journal of Fluid Mechanics* (425), 161-185.
- Walker, D. (1987). A fluorescent technique for measurement of concentration in mixing liquids. *J. Phys. E: Sci. Instrum.* (20), 217-224.
- Wang, J., Wei, Z., Zhang, M., & Huang, Z. (2014). A review of engine application and fundamental study on turbulent premixed combustion of hydrogen enriched natural gas. *Science China Technological Sciences* , 57 (3), 445-451.
- Zeldovich, Y. (1946). The Oxidation of Nitrogen in Combustion and Explosions. *Acta Physicochimica U.R.S.S.* (21), 577-628.